

技术  
视点

NEXT

LLVM Cookbook 中文版

电子工业出版社



LLVM Cookbook

# LLVM Cookbook

## 中文版

针对常见问题的快速解答  
帮助你构建基于LLVM的编译器前端、优化器和代码生成器

【印】Mayur Pandey Suyog Sarda 著  
王欢明 译



中国工信出版集团



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY



# 目录

[内容简介](#)

[译者序](#)

[关于作者](#)

[关于审校者](#)

[前言](#)

[第1章 LLVM设计与使用](#)

[概述](#)

[模块化设计](#)

[交叉编译Clang/LLVM](#)

[将C源码转换为LLVM汇编码](#)

[将LLVM IR转换为bitcode](#)

[将LLVM bitcode转换为目标平台汇编码](#)

[将LLVM bitcode转回为LLVM汇编码](#)

[转换LLVM IR](#)

[链接LLVM bitcode](#)

[执行LLVM bitcode](#)

[使用C语言前端——Clang](#)

[使用GO语言前端](#)

[使用DragonEgg](#)

[第2章 实现编译器前端](#)

[概述](#)

[定义TOY语言](#)

[实现词法分析器](#)

[定义抽象语法树](#)

[实现语法分析器](#)

[解析简单的表达式](#)

[解析二元表达式](#)

[为解析编写驱动](#)

[对TOY语言进行词法分析和语法分析](#)

[为每个AST类定义IR代码生成方法](#)

[为表达式生成IR代码](#)

[为函数生成IR代码](#)

[增加IR优化支持](#)

[第3章 扩展前端并增加JIT支持](#)

[概述](#)

[处理条件控制结构——if/then/else结构](#)

[生成循环结构](#)

[处理自定义二元运算符](#)

[处理自定义一元运算符](#)

[增加JIT支持](#)

## [第4章 准备优化](#)

[概述](#)

[多级优化](#)

[自定义LLVM Pass](#)

[使用opt工具运行自定义Pass](#)

[在新的Pass中调用其他Pass](#)

[使用Pass管理器注册Pass](#)

[实现一个分析Pass](#)

[实现一个别名分析Pass](#)

[使用其他分析Pass](#)

## [第5章 实现优化](#)

[概述](#)

[编写无用代码消除Pass](#)

[编写内联转换Pass](#)

[编写内存优化Pass](#)

[合并LLVM IR](#)

[循环的转换与优化](#)

[表达式重组](#)

[IR向量化](#)

[其他优化Pass](#)

## [第6章 平台无关代码生成器](#)

[概述](#)

[LLVM IR指令的生命周期](#)

[使用GraphViz可视化LLVM IR控制流图](#)

[使用TableGen描述目标平台](#)

[定义指令集](#)

[添加机器码描述](#)

[实现MachineInstrBuilder类](#)

[实现MachineBasicBlock类](#)

[实现MachineFunction类](#)

[编写指令选择器](#)

[合法化SelectionDAG](#)

[优化SelectionDAG](#)

[基于DAG的指令选择](#)

[基于SelectionDAG的指令调度](#)

## [第7章 机器码优化](#)

[概述](#)

[消除机器码公共子表达式](#)

[活动周期分析](#)

[寄存器分配](#)

[插入头尾代码](#)

[代码发射](#)

[尾调用优化](#)

[兄弟调用优化](#)

## [第8章 实现LLVM后端](#)

[概述](#)

[定义寄存器和寄存器集合](#)

[定义调用约定](#)

[定义指令集](#)

[实现栈帧lowering](#)

[打印指令](#)

[选择指令](#)

[增加指令编码](#)

[子平台支持](#)

[多指令lowering](#)

[平台注册](#)

## [第9章 LLVM项目最佳实践](#)

[概述](#)

[LLVM中的异常处理](#)

[使用sanitizer](#)

[使用LLVM编写垃圾回收器](#)

[将LLVM IR转换为JavaScript](#)

[使用Clang静态分析器](#)

[使用bugpoint](#)

[使用LLDB](#)

[使用LLVM通用Pass](#)

图书在版编目（CIP）数据

LLVM           Cookbook中文版/（印）潘迪（Pandey,M.），（印）撒达（Sarda,S.）著；王欢明译.—北京：电子工业出版社，2016.6

ISBN 978-7-121-28847-0

I . ①L...   II . ①潘... ②撒... ③王...   III. ①编译程序—程序设计   IV.  
①TP314

中国版本图书馆CIP数据核字（2016）第108748号

策划编辑：张春雨

责任编辑：付 睿

印 刷：三河市双峰印刷装订有限公司

装 订：三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编：100036

开 本：787×980 1/16 印张：19.25 字数：375千字

版 次：2016年6月第1版

印 次：2016年6月第1次印刷

定 价：75.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至zlt@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：010-51260888-819 faq@phei.com.cn。

Copyright © Packt Publishing 2015. First published in the English language under the title ‘LLVM Cookbook’.

本书简体中文版专有出版权由Packt Publishing授予电子工业出版社。未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。专有出版权受法律保护。

版权贸易合同登记号 图字：01-2015-6374

# 内容简介

本书以任务驱动的方式，带领读者编写基于LLVM的编译器前端、优化器、后端。通过丰富的实例，读者能够从中理解LLVM的架构，以及如何使用LLVM来编写自己的编译器。

相比于传统的介绍编译技术的书籍，此书更偏向于实战，因此适合熟悉编译但对LLVM比较陌生的人员，也适合正在学习编译技术并且在寻找实战机会的人员。

# 译者序

LLVM这个名字源于Lower Level Virtual Machine，但这个项目并不局限于创建一个虚拟机，它已经发展成为当今炙手可热的编译器基础框架。LLVM最初以C/C++为编译目标，近年来经过众多机构和开源社区的努力，LLVM已经能够为ActionScript、D、Fortran、Haskell、Java、Objective-C、Swift、Python、Ruby、Rust、Scala等众多语言提供编译支持，而一些新兴语言则直接采用了LLVM作为后端。可以说，LLVM对编译器领域的发展起到了举足轻重的作用。

本书是目前为数不多的介绍LLVM的书籍。本书从LLVM的构建与安装开始说起，介绍了LLVM的设计思想、LLVM工具链、前端、优化器、后端，涵盖了LLVM的绝大部分内容。本书以任务驱动的方式对内容进行介绍，围绕着实现TOY语言的编译器，每一章节都会带领读者编写代码。在第2章实现了编译器的前端，第4、5章逐步实现优化器，后面的章节则实现了编译器后端。书中以实践的方式进行讲述，既阐述了原理，又让读者参与到编译器的开发当中，这一方面降低了学习LLVM的门槛，另一方面也让读者在实践中理解LLVM的细节。

作为译者，我觉得能够翻译此书也是一种缘分。最初是因为一次偶然的机会，我接触了一些自然语言处理的内容，在此过程中我领悟了词法分析和语法分析是怎么一回事；之后凭借着自己先前了解的零零碎碎的知识，在没有系统学习过编译原理的情况下写出了自己的第一个解释器（当然它很不完备）；接着便去系统学习编译原理，由于有了一定的实践基础，理解那些概念也轻松了许多；而关于这本书的翻译，则是因为在豆瓣上看到了一位豆友转发的消息，遂联系出版社的张春雨老师；最后在翻译此书的过程中，也收获了很多。

所以在这里要感谢带我走近自然语言处理的那位朋友，要感谢转发此消息的那位豆友，还要感谢博文视点的张春雨老师。人生充满了机缘巧合，我很幸运能够遇见你们。

与此同时，我也希望此书能够揭开编译器的面纱，能够让国内更多

的人了解编译技术。

王欢明  
2015年8月

# 关于作者

**Mayur Pandey**是一名专业的软件工程师，同时也是一位开源软件的爱好者。他专注于编译器以及编译器工具的开发，是LLVM开源社区的活跃贡献者，也是Tizen编译器项目的一员，他对其他编译器也有着亲身实践经验。

Mayur在印度阿拉哈巴德的Motilal Nehru国家技术研究所获得学士学位。目前居住在印度班加罗尔。

“我要感谢我的家人和朋友，是他们帮我料理其他事务并且鼓励我，才使得我能够完成这本书的创作。”

**Suyog Sarda**是一名专业的软件工程师，同时也是一位开源软件的爱好者。他专注于编译器以及编译器工具的开发，是LLVM开源社区的活跃贡献者，也是Tizen编译器项目的一员。除此之外，Suyog也参与了ARM和x86架构的代码改进工作。他对其他的编译器也有着亲身实践经验。他对编译器的主要研究在于代码优化和向量化。

除了编译器之外，Suyog也对Linux内核的开发很感兴趣。他曾在2012年于迪拜由Birla技术协会举办的IEEE国际云计算技术应用大会的议程上发表技术论文，题为“*Secure Co-resident Virtualization in Multicore Systems by VM Pinning and Page Coloring*”。他在印度普纳工程大学获得计算机学士学位。目前居住于印度班加罗尔。

“我要感谢我的家人和朋友，也向一直帮助我的LLVM开源社区致以谢意。”

# 关于审校者

**Logan Chien**在台湾国立大学获得计算机科学硕士学位。他的研究方向包括编译器设计、编译器优化、虚拟机。他是一名全职的软件工程师，在空闲时间，他从事多个开源项目的开发工作，例如LLVM、Android。Logan在2012年加入LLVM项目的开发。

**Michael Haidl**是一名高性能计算工程师，致力于多核架构的研究，例如GPU、Intel Xeon Phi accelerator。他有着超过14年的C++开发经验，在并行计算方面有着丰富经验，在多年的工作中开发出多种编程模型（CUDA）。他同时有计算机科学和物理学的学位。目前，Michael在德国明斯德大学担任研究助理，一边写着他PhD论文，一边致力于研究基于LLVM架构的GPU编译技术。

“我要感谢每天用微笑和爱来支持我的妻子，同时也向为Clang/LLVM和其他LLVM项目付出辛勤工作的整个LLVM社区致以谢意。正是有了他们，LLVM项目才能茁壮成长。”

**Dave (Jing) Tian**是弗罗里达大学计算机和信息工程学院的研究助理及PhD学生。他是SENSEI中心的创始人之一。他的研究方向包括系统安全、嵌入式系统安全、可信计算、安全的静态代码分析及向量化。他对Linux内核开发和编译器都有着浓厚的兴趣。

Dave花了一年时间研究人工智能和机器学习，在俄勒冈州大学教过Python和操作系统。在此之前，他在阿尔卡特朗讯公司Linux控制平台开发组从事过4年时间的软件开发工作。他在中国获得学士学位，以及电气工程的硕士学位。你可以在root@davejingtian.org及<http://davejingtian.org>了解他。

“我要感谢这本书的作者，他做得很好。也感谢Packt出版社的编辑们，是他们润色了这本书并且给我审校这本书的机会。”

# 前言

程序员在编程时没有一刻可以离开编译器。简单来说，所谓编译器就是把人类可读的高级语言映射到机器执行码。但你知道这里面发生了什么吗？编译器在生成优化过的机器码之前还做了很多处理工作，一个好的编译器包含了很多复杂的算法。

这本书介绍了编译的几个阶段：前端处理、代码优化、代码生成等。为了将这个复杂的过程简化，LLVM使用了模块化的思想，使得每一个编译阶段都被独立出来；LLVM使用面向对象的C++语言完成，为编译器开发人员提供了易用而丰富的编程接口和API。所以，LLVM可能是最容易学习的编译器框架了。

作为作者，我们认为简单的解决方案往往比复杂的解决方案更加奏效；通过这本书，我们将会了解许多编译技术，它能提升你的能力，让你了解编译选项，理解编译过程。

我们也相信，那些从事编译器开发的程序员会从本书收益良多，因为对编译器技术的了解会帮助他们写出更好的代码。

我们希望你能喜欢这本书，享受这本书提供的技术盛宴，也能开发自己的编译器。迫不及待了吗？让我们开始吧。

## 本书概述

**第1章： LLVM设计与使用。**本章介绍了模块化的LLVM基础架构设计，让你学会如何下载安装LLVM和Clang，通过一些例子来了解如何使用LLVM工作，也会介绍一些其他的编译器前端。

**第2章： 实现编译器前端。**本章介绍了如何为一门编程语言编写一个编译器前端，我们通过为一门玩具语言写一个玩具编译器，来了解如何把前端语言映射到LLVM IR。

第3章：扩展前端并增加JIT支持。本章为这门玩具语言增加了一些现代语言的高级特性，以及对前端的JIT支持。

第4章：准备优化。本章介绍LLVM IR的Pass结构，以及不同的优化级别和每一级别的优化技术。我们也将看到如何一步一步编写自己的LLVM Pass。

第5章：实现优化。本章介绍如何在LLVM IR上实施诸多优化Pass，以及在LLVM开源代码上实现一些向量化技术。

第6章：平台无关代码生成器。本章介绍了一个平台无关代码生成器的抽象结构，如何把LLVM IR转换到有向无环图（DAG），以及如何进一步生成目标平台机器码。

第7章：机器码优化。本章介绍了DAG的优化过程，目标寄存器分配算法，还介绍了Selection DAG上的各种优化技术及不同寄存器的分配技术。

第8章：实现LLVM后端。本章介绍了目标架构，包括寄存器、指令集、调用约定、编码、子平台特性等。

第9章：LLVM项目最佳实践。本章介绍了一些使用LLVM IR做代码分析的其他项目。需要记住的是，LLVM不仅仅是一个编译器，而且是一个编译器框架。本章介绍了一段可应用到各种项目的代码，可从中获取有用信息。

## 阅读背景

你只需要一台Linux计算机，最好是Ubuntu系统，就能完成本书的大部分例子。你也需要一个简单的文本或代码编辑器、网络连接，以及一个浏览器。我们建议安装两个文件的合并包，它在大部分Linux平台都能运行。

## 读者对象

本书适合那些熟悉编译器概念并且想理解学习LLVM的程序员。

本书也适合不直接参与编译器开发但参与大量代码开发的程序员。具备一定的编译器知识将会使你写出更加优秀的代码。

## 内容组织

在此书中你会频繁地看到一些标题，例如准备工作、详细步骤、工作原理、更多内容、另请参阅。

为了更好地呈现本书内容，我们采用了如下的组织方式。

### 准备工作

这部分对章节做了概述，并且描述了如何配置软件及其他工具。

### 详细步骤

这部分涵盖了具体的实践步骤。

### 工作原理

这部分涵盖了前一部分的详细解释。

### 更多内容

这部分涵盖了关于章节的更多信息。

### 另请参阅

这部分涵盖了参考资料的链接。

### 约定

在本书中你会发现大量用不同格式展示的文字，这里举例说明它们的涵义。

嵌入代码、数据库表名、目录名、文件名、文件扩展名、路径名、URL、用户输入、Twitter用如下方式展示：“我们可以用include指令引入其他的上下文。”

代码块用如下格式：

```
primary := identifier_expr :  
=numeric_expr  
:=paran_expr
```

当我们想强调部分代码块时，相关行会使用粗体：

```
primary := identifier_expr  
=numeric_expr  
:=paran_expr
```

命令行输入和输出用如下格式：

```
$ cat testfile.ll
```

新的术语和重要单词也会用黑体显示。你在屏幕上看到的内容，包括对话框或菜单，会这样显示：“单击下一步将进入下一屏”。

警告或者重要内容会在这块展示

一些提示和技巧。

## 下载示例代码

你可以从<http://www.broadview.com.cn>下载所有已购买的博文视点书

籍的示例代码文件。

## 勘误表

虽然我们已经尽力谨慎地确保内容的准确性，但错误仍然存在。如果你发现了书中的错误，包括正文和代码中的错误，请告诉我们，我们会非常感激。这样，你不仅帮助了其他读者，也帮助我们改进后续的出版。如发现任何勘误，可以在博文视点网站相应图书的页面提交勘误信息。一旦你找到的错误被证实，你提交的信息就会被接受，我们的网站也会发布这些勘误信息。你可以随时浏览图书页面，查看已发布的勘误信息。

# 第1章 LLVM设计与使用

本章涵盖以下话题。

- 模块化设计
- 交叉编译Clang/LLVM
- 将C源码转换为LLVM汇编码
- 将LLVM IR转换为bitcode
- 将LLVM bitcode转换为目标平台汇编码
- 将LLVM bitcode转回为LLVM汇编码
- 转换LLVM IR
- 链接LLVM bitcode
- 执行LLVM bitcode
- 使用C语言前端——Clang
- 使用GO语言前端
- 使用DragonEgg

# 概述

本节介绍LLVM的设计理念，以及如何使用LLVM提供的诸多工具。你将了解如何把C语言代码编译为LLVM IR（Intermediate Representation——中间码）以及如何把它转为其他多种形式。你也会看到在LLVM的源码树中代码是如何组织的，以及如何使用LLVM自己编写一个编译器。

# 模块化设计

与其他编译器（例如**GNU Compiler Collection——GCC**）不同，LLVM的设计目标是成为一系列的库。本节以LLVM优化器（optimizer）为例来解释这个概念，因为它的设计就是基于库的。它允许你选择各个Pass（趟）的执行顺序，也能够选择执行哪些优化Pass——也就是说，有一些优化对你设计的系统是没有帮助的，只有少数优化会针对你的系统。反观传统的编译器优化器，它们通常是由大量高度耦合的代码组成，很难拆分成容易理解和使用的小模块。而在LLVM中，如果你想了解特定的优化器，是不需要知道整个系统是如何工作的。你只需选择一个优化器并使用它，无须担心其他依赖它的组件。

在我们开始本节之前，我们需要知道一点关于LLVM汇编码的知识。LLVM的代码有3种表示形式：内存编译器中的**IR**、存于磁盘的bitcode，以及用户可读的汇编码。LLVM IR是基于静态单赋值<sup>[1]</sup>（Static Single Assignment——SSA）的，并且提供了类型安全性、底层操作性、灵活性，因此能够清楚表达绝大多数高级语言。这种表示形式贯穿LLVM编译的各个阶段。事实上，LLVM IR致力于成为一种足够底层的通用IR，只有这样，高级语言的诸多特性才能够得以实现。同样，LLVM IR组织良好，也具备不错的可读性。如果你对理解本节提到的LLVM汇编码有任何疑问，请参考本节结尾的“另请参阅”一节。

SSA于1980年由IBM开始研究，由于它的一些良好性质，之后在编译器领域得到广泛应用，包括LLVM。

## 准备工作

在开始之前，我们需要在本机安装LLVM工具链，特别是opt工具。

## 详细步骤

我们将在同一段代码上逐步实施两个不同的优化，来观察它们分别是如何改变代码的。

1. 首先，我们来写一段代码用作优化器的输入，在这里创建 testfile.ll 文件。

```
$ cat testfile.ll
define i32 @test1(i32 %A) {
    %B = add i32 %A, 0
    ret i32 %B
}

define internal i32 @test(i32 %X, i32 %dead) {
    ret i32 %X
}

define i32 @caller() {
    %A = call i32 @test(i32 123, i32 456)
    ret i32 %A
}
```

2. 现在，使用 opt 工具来进行一个优化——指令合并。

```
$ opt -S -instcombine testfile.ll -o output1.ll
```

3. 查看输出，看看 instcombine 优化是如何进行的：

```
$ cat output1.ll
; ModuleID = 'testfile.ll'

define i32 @test1(i32 %A) {
    ret i32 %A
}

define internal i32 @test(i32 %X, i32 %dead) {
    ret i32 %X
}

define i32 @caller() {
    %A = call i32 @test(i32 123, i32 456)
    ret i32 %A
}
```

4. 使用opt工具进行无用参数消除（dead-argument-elimination）优化：

```
$ opt -S -deadargelim testfile.ll -o output2.ll
```

5. 查看输出，看看deadargelim优化的效果如何：

```
$ cat output2.ll
; ModuleID = testfile.ll'
define i32 @test1(i32 %A) {
    %B = add i32 %A, 0
    ret i32 %B
}

define internal i32 @test(i32 %X) {
    ret i32 %X
}

define i32 @caller() {
    %A = call i32 @test(i32 123)
    ret i32 %A
}
```

## 工作原理

在前面的代码中，我们可以看到，第1个命令运行instcombine Pass，会将指令合并，因此 $%B = add i32 %A, 0;$   $ret i32 %B$ 被优化为 $ret i32 %A$ ，并且没有改变原来的代码，而是产生了新的代码。

在第2个样例中，运行deadargelim pass，对第一个函数没有任何影响，但优化对第2个函数有所影响——前一次优化中没有修改的部分代码在本次优化中被改变，无用的参数被消除了。

LLVM优化器为用户提供了不同的优化Pass，但整体的编写风格一致。对每个Pass的源码编译，得到一个Object文件，之后这些不同的文件再链接得到一个库。Pass之间耦合很小，而Pass之间的依赖信息由 LLVM Pass管理器（PassManager）来统一管理，在Pass运行的时候会

进行解析。下面的图片展示了每个Pass如何关联到指定库中的特定的Object文件。图中，**PassA**中**PassA.o**引用了**LLVMPasses.a**，而自定义的Pass中**MyPass.o** Object文件引用了不同的库**MyPasses.a**。

## 下载样例代码

你可以从<http://www.broadview.com.cn>为你购买的博文视点图书  
下载示例代码，按提示注册后，找到本书页面即可开始下载。



# 更多内容

与优化器相似，LLVM代码生成器（code generator）也采用了模块的设计理念，它将代码生成问题分解为多个独立Pass：指令选择、寄存器分配、指令调度、代码布局优化、代码发射。同样，也有许多内建的Pass，它们默认执行，但用户可以选择只执行其中一部分。

## 另请参阅

- 在接下来的章节中，我们会看到如何编写自己的Pass，并且能够选择执行哪些优化Pass及其执行顺序。如果想详细了解，请参见 <http://www.osa-book.org/en/llvm.html>。
- 关于LLVM IR的更多信息，请参见 <http://llvm.org/docs/LangRef.html>。

# 交叉编译Clang/LLVM

所谓交叉编译，指的是我们能够在一个平台（例如x86）编译并构建二进制文件，而在另一个平台（例如ARM）运行。编译二进制文件的机器称为主机（host），而运行生成的二进制文件的平台我们称为目标平台（target）。为相同平台（主机与目标机器相同）编译代码我们称为本机编译（**native assembler**），而当主机与目标机器为不同平台时编译代码则称为交叉编译（**cross-compiler**）。

本节将展示LLVM交叉编译的技术，你可以为与主机平台不同的平台编译LLVM，因此你能够在所需的特定目标平台使用构建的二进制文件。在这里，交叉编译将通过在x86\_64主机平台为ARM目标平台编译LLVM来展示，编译出的可执行文件能够在ARM架构的平台上执行。

## 准备工作

在此之前你需要为系统（主机平台）安装以下包（程序）：

- cmake
- ninja-build（来自Ubuntu的backport）
- gcc-4.x-arm-linux-gnueabihf
- gcc-4.x-multilib-arm-linux-gnueabihf binutils-arm-linux-gnueabihf
- libgcc1-armhf-cross
- libsfgcc1-armhf-cross
- libstdc++6-armhf-cross
- libstdc++6-4.x-dev-armhf-cross
- install llvm on your host platform

## 详细步骤

为了从主机架构（这里是X86\_64平台）为ARM目标平台编译代码，你需要执行以下步骤。

1. 使用以下cmake参数调用cmake，构建LLVM：

```
-DCMAKE_CROSSCOMPILING=True  
-DCMAKE_INSTALL_PREFIX=<工具链安装目录（可选）>  
-DLLVM_TABLEGEN=<已安装的LLVM工具链目录>/llvm-tblgen  
-DCLANG_TABLEGEN=<已安装的LLVM工具链目录>/clang-tblgen  
-DLLVM_DEFAULT_TARGET_TRIPLE=arm-linux-gnueabihf  
-DLLVM_TARGET_ARCH=ARM  
-DLLVM_TARGETS_TO_BUILD=ARM  
-DCMAKE_CXX_FLAGS=' -target armv7a-linux-gnueabihf -mcpu=cortex-a9  
-I/usr/arm-linux-gnueabihf/include/c++/4.x.x/arm-linux-gnueabihf/  
-I/usr/arm-linux-gnueabihf/include/ -mfloat-abi=hard -ccc-gcc-  
name  
arm-linux-gnueabihf-gcc'
```

2. 如果你使用平台自带的编译器，运行：

```
$ cmake -G Ninja<LLVM源码目录><上面的选项>
```

如果使用Clang作为交叉编译器，需要在path环境变量中包含Clang/Clang++：

```
$ CC='clang' CXX='clang++' cmake -G Ninja <源码目录> <上面的选项>
```

3. 编译LLVM，简单类型：

```
$ ninja
```

4. 在成功编译LLVM/Clang之后，只需要用如下命令安装一下：

```
$ ninja install
```

如果你指定了DCMAKE\_INSTALL\_PREFIX参数，则会在install-dir这个位置创建sysroot<sup>[2]</sup>。

# 工作原理

`cmake`包用来构建所需平台的LLVM工具链，你需要为其指定参数；`tblgen`工具用于把目标平台的描述文件转换成C++代码，因此，通过它可以获得目标平台的相关信息——比如指令集、寄存器数量等。

如果用Clang作为交叉编译器，构建ARM平台的后端时可能会出现一个问题，即在地址无关代码（**position-independent code —— PIC**）生成过程中的绝对地址重定向，这时候可以关闭PIC作为解决方案。

在主机上，由于架构的不同，是无法使用ARM平台的库的，所以你可以下载一份，或者自己编译构建。

# 将C源码转换为LLVM汇编码

本节将使用C语言前端——Clang，把C语言源码转换为LLVM IR。

## 准备工作

你需要安装Clang并且把它添加到PATH环境变量中。

## 详细步骤

1. 首先在multiply.c文件中编写一段C语言代码，如下：

```
$ cat multiply.c
int mult() {
    int a = 5;
    int b = 3;
    int c = a * b;
    return c;
}
```

2. 使用以下命令来将C语言代码转换成LLVM IR：

```
$ clang -emit-llvm -S multiply.c -o multiply.ll
```

3. 生成如下的LLVM IR：

```
$ cat multiply.ll
; ModuleID = 'multiply.c'
target datalayout = "e-m:e-i64:64-f80:128-n8:16:32:64-S128"
target triple = "x86_64-unknown-linux-gnu"
```

```
; Function Attrs: nounwind uwtable
define i32 @mult() #0 {
    %a = alloca i32, align 4
    %b = alloca i32, align 4
    %c = alloca i32, align 4
    store i32 5, i32* %a, align 4
    store i32 3, i32* %b, align 4
    %1 = load i32* %a, align 4
    %2 = load i32* %b, align 4
    %3 = mul nsw i32 %1, %2
    store i32 %3, i32* %c, align 4
    %4 = load i32* %c, align 4
    ret i32 %4
}
```

或者通过cc1生成IR:

```
$ clang -cc1 -emit-llvm testfile.c -o testfile.ll
```

## 工作原理

将C语言代码编译为LLVM IR的过程从词法分析开始——将C语言源码分解成token流，每个token可表示标识符、字面量、运算符等；token流会传递给语法分析器，语法分析器会在语言的**CFG (Context Free Grammar)**（上下文无关文法）的指导下将token流组织成AST（抽象语法树）；接下来会进行语义分析，检查语义正确性，然后生成IR。

这里我们使用Clang前端来将C代码转为IR文件。

## 另请参阅

- 在第2章中，我们将会看到词法分析、语法分析和代码生成的工作原理。关于LLVM IR的基本信息，请参阅 <http://llvm.org/docs/LangRef.html>。

# 将LLVM IR转换为bitcode

本节将介绍如何从LLVM IR来生成bitcode。LLVM bitcode（也称为字节码——bytecode）由两部分组成：位流（bitstream，可类比字节流），以及将LLVM IR编码成位流的编码格式。

## 准备工作

你需要安装llvm-as工具，并添加到PATH环境变量中。

## 详细步骤

执行以下步骤。

- 首先创建LLVM IR代码作为llvm-as的输入：

```
$ cat test.ll
define i32 @mult(i32 %a, i32 %b) #0 {
    %1 = mul nsw i32 %a, %b
    ret i32 %1
}
```

- 执行以下命令把test.ll文件的LLVM IR转为bitcode格式：

```
llvm-as test.ll -o test.bc
```

- 输出到test.bc文件，它是位流格式的；由于它是二进制的，如果我们直接看它的内容，会发现：



因为它是bitcode文件，所以会看到一堆乱码。查看它的内容的最好方式是使用hexdump工具，下面的截图是hexdump的输出：



# 工作原理

`llvm-as`即是LLVM的汇编器。它会将LLVM IR转为bitcode（就像把普通的汇编码转成可执行文件）。在之前的命令中，它使用`test.ll`作为输入，`test.bc`作为bitcode输出文件。

## 更多内容

为了把LLVM IR转为bitcode，我们引入了区块（block）和记录（record）的概念。区块表示位流的区域，例如一个函数体、符号表等。每个区块的内容都对应一个特定的ID，例如LLVM IR中函数体的ID是12。记录由一个记录码和一个整数值组成，它们描述了在指令、全局变量描述符、类型描述中的实体。

LLVM IR的bitcode文件由一个简单的封装结构封装。结构包括一个描述文件段落偏移量的简单描述头，以及内嵌BC文件的大小。

## 另请参阅

- 关于LLVM位流文件格式的更多信息，请参阅  
<http://llvm.org/docs/BitCodeFormat.html#abstract>。

# 将LLVM bitcode转换为目标平台汇编码

本节介绍如何将LLVM bitcode文件转换为目标机器的汇编码。

## 准备工作

你需要安装来自LLVM工具链的LLVM静态编译器llc。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 前一节创建的test.bc bitcode文件可作为llc的输入，通过以下命令可把LLVM bitcode转换为汇编码：

```
$ llc test.bc -o test.s
```

2. 输出到test.s汇编文件，可通过以下命令查看：

```
$ cat test.s
.text
.file "test.bc"
.globl mult
.align 16, 0x90
.type mult,@function
mult:                                # @mult
.cfi_startproc
# BB#0:
Pushq %rbp
.Ltmp0:
.cfi_def_cfa_offset 16
```

```
.Ltmp1:  
.cfi_offset %rbp, -16  
movq %rsp, %rbp  
.Ltmp2:  
.cfi_def_cfa_register %rbp  
imull %esi, %edi  
movl %edi, %eax  
popq %rbp  
retq  
.Ltmp3:  
.size mult, .Ltmp3-mult  
.cfi_endproc
```

3. 或者通过Clang从bitcode文件格式生成汇编码，需要使用-S参数，得到test.s汇编文件和test.bc位流格式文件：

```
$ clang -S test.bc -o test.s -fomit-frame-pointer #使用Clang前端
```

输出的test.s文件和之前样例的一样。另外，我们使用了fomit-frame-pointer参数，因为Clang默认不消除帧指针而llc却默认消除。

## 工作原理

llc命令把LLVM 输入编译为特定架构的汇编语言，如果我们在之前的命令中没有为其指定任何架构，那么默认生成本机的汇编码，即调用llc命令的主机。如果你想更进一步由汇编文件得到可执行文件，你还可以使用汇编器和链接器。

## 更多内容

在以上命令中加入-march=architechture参数，可以生成特定目标架构的汇编码。使用-mcpu(cpu)参数则可以指定其CPU，而-reg alloc =basic/greedy/fast/pbqp则可以指定寄存器分配类型。

# 将LLVM bitcode转回为LLVM汇编码

本节介绍如何通过反汇编工具llvm-dis把LLVM bitcode转回为LLVM IR。

## 准备工作

你需要安装llvm-dis工具。

## 详细步骤

为了展示如何将bitcode文件转为IR，使用“将LLVM IR转换为bitcode”那一节得到的test.bc文件作为llvm-dis工具的输入。执行以下步骤。

1. 执行以下命令把bitcode文件转换为我们之前创建过的IR文件：

```
$ llvm-dis test.bc -o test.ll
```

2. 查看其生成的LLVM IR：

```
| $ cat test.ll
; ModuleID = 'test.bc'

define i32 @mult(i32 %a, i32 %b) #0 {
  %1 = mul nsw i32 %a, %b
  ret i32 %1
}
```

输出的test.ll文件和我们之前在“将LLVM IR转换为bitcode”那一节得到的相同。

# 工作原理

`llvm-dis`命令即是LLVM反汇编器，它使用LLVM bitcode文件作为输入，输出LLVM IR。

这里，输入文件是`test.bc`，通过`llvm-dis`工具转为`test.ll`。

如果省略文件名，`llvm-dis`工具会从标准输入读取输入。

# 转换LLVM IR

本节介绍使用opt工具把IR转换成其他形式，以及对IR代码实施的多个优化。

## 准备工作

你需要先安装opt工具。

## 详细步骤

使用以下命令用opt执行转换Pass。

```
$opt -passname input.ll -o output.ll
```

1. 来看一个真实的样例，我们采用“将C源码编译为LLVM汇编码”那一节的C语言代码作为输入，创建等价的LLVM IR：

```
$ cat multiply.c
int mult() {
    int a = 5;
    int b = 3;
    int c = a * b;
    return c;
}
```

2. 转化成IR并输出内容，我们会得到以下未进行优化的输出：

```
$ clang -emit-llvm -S multiply.c -o multiply.ll
$ cat multiply.ll
; ModuleID = 'multiply.c'
target datalayout = "e-m:e-i64:64-f80:128-n8:16:32:64-S128"
```

```

target triple = "x86_64-unknown-linux-gnu"

; Function Attrs: nounwind uwtable
define i32 @mult() #0 {
    %a = alloca i32, align 4
    %b = alloca i32, align 4
    %c = alloca i32, align 4
    store i32 5, i32* %a, align 4
    store i32 3, i32* %b, align 4
    %1 = load i32* %a, align 4
    %2 = load i32* %b, align 4
    %3 = mul nsw i32 %1, %2
    store i32 %3, i32* %c, align 4
    %4 = load i32* %c, align 4
    ret i32 %4
}

```

3. 现在使用opt工具进行一个转换，优化内存访问（将局部变量从内存提升到寄存器）：

```

$ opt -mem2reg -S multiply.ll -o multiply1.ll
$ cat multiply1.ll
; ModuleID = 'multiply.ll'
target datalayout = "e-m:e-i64:64-f80:128-n8:16:32:64-S128"
target triple = "x86_64-unknown-linux-gnu"

; Function Attrs: nounwind uwtable
define i32 @mult(i32 %a, i32 %b) #0 {
    %1 = mul nsw i32 %a, %b
    ret i32 %1
}

```

## 工作原理

opt是LLVM的优化和分析工具，采用input.ll文件作为输入，并且按照passname执行Pass。在执行Pass之后的输出存于output.ll文件，其中包含转换后的IR代码。opt工具可以使用多个Pass。

# 更多内容

如果给opt工具传入-analyze参数，它会在输入源码上执行不同的分析，并且在标准输出流或错误流打印分析结果。当然，输出也能重定向到另一个程序或者一个文件。

如果不为opt工具传入-analyze参数，它会对输入执行转换Pass，以进行优化。

下面列出了一些重要的转换，可作为参数传递给opt工具：

- **adce:** 入侵式无用代码消除。
- **bb-vectorize:** 基本块向量化。
- **constprop:** 简单常量传播。
- **dce:** 无用代码消除。
- **deadargelim:** 无用参数消除。
- **globaldce:** 无用全局变量消除。
- **globalopt:** 全局变量优化。
- **gvn:** 全局变量编号。
- **inline:** 函数内联。
- **instcombine:** 冗余指令合并。
- **licm:** 循环常量代码外提。
- **loop-unswitch:** 循环外提。
- **loweratomic:** 原子内建函数lowering。
- **lowerinvoke:** invoke指令lowering，以支持不稳定的代码生成器。
- **lowerswitch:** switch指令lowering。
- **mem2reg:** 内存访问优化。
- **memcpyopt:** MemCpy优化。
- **simplifycfg:** 简化CFG。
- **sink:** 代码提升。
- **tailcallelim:** 尾调用消除。

要弄明白这些优化如何工作，你最好至少运行一些之前的Pass。另外，如果想要得到这些Pass可应用的合适的源码，你可以到 llvm/test/Transforms目录。对于以上的每一个Pass，在那里都可以看到测

试代码。你可以应用相关Pass并查看测试代码如何被修改。

为了弄明白C语言代码是如何映射到LLVM IR的，你可以在将C代码转换为IR之后（在“将C源码转换为LLVM汇编码”一节提到），运行mem2reg Pass，它会帮助你明白C指令是如何映射到IR指令的。

# 链接LLVM bitcode

本节介绍如何把之前生成的.bc文件变成一个单一的包含了所有所需引用的bitcode文件。

## 准备工作

你需要先安装llvm-link工具，用它来链接.bc文件。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 为了展示llvm-link的功能，首先在不同文件中编写两段代码，其中一个引用另一个：

```
$ cat test1.c
int func(int a) {
a = a*2;
return a;
}
$ cat test2.c
#include<stdio.h>
extern int func(int a);
int main() {
int num = 5;
num = func(num);
printf("number is %d\n", num);
return num;
}
```

2. 使用以下命令将C代码转换成位流文件格式，先转成.ll文件，再

将.ll文件转成.bc文件：

```
$ clang -emit-llvm -S test1.c -o test1.ll
$ clang -emit-llvm -S test2.c -o test2.ll
$ llvm-as test1.ll -o test1.bc
$ llvm-as test2.ll -o test2.bc
```

我们得到了test1.bc和test2.bc，而test2.bc引用了test1.bc文件中的func语法。

3. 通过如下方式使用llvm-link命令链接两个LLVM bitcode文件：

```
$ llvm-link test1.bc test2.bc -o output.bc
```

我们给llvm-link工具提供了多个bitcode文件，并链接得到单个bitcode输出文件——output.bc。我们将在下一节“执行LLVM bitcode”运行这个bitcode文件。

## 工作原理

llvm-link工具的功能和传统的链接器一致：如果一个函数或者变量在一个文件中被引用，却在另一个文件中定义，那么链接器就会解析这个文件中引用的符号。但和传统的链接器不同，llvm-link不会链接Object文件生成一个二进制文件，它只链接bitcode文件。

在前面的场景中我们链接test1.bc和test2.bc文件生成output.bc文件，而它的引用已经被解析并链接了。

在链接bitcode文件之后，我们可以传递-S参数给llvm-link工具来输出IR文件。

# 执行LLVM bitcode

本节介绍如何执行之前得到的LLVM bitcode文件。

## 准备工作

你需要先安装lli工具，用它来执行LLVM bitcode。

## 详细步骤

在前一节中我们看到在链接两个.bc文件之后会得到单个的位流文件，其中一个文件引用了另一个文件定义的func函数。而调用lli命令可以执行之前得到的output.bc文件，直接在标准输出里给出结果：

```
| $ lli output.bc  
number is 10
```

lli的输入是output.bc文件，它会执行bitcode文件，如果有输出会在标准输出显示结果。在这个样例中输出结果是“number is 10”，这就是由之前章节中的test1.c和test2.c链接得到的output.bc文件的执行结果。test2.c文件的主函数调用了test1.c文件的func函数，并用整数5作为参数；而func函数把输入参数乘以2之后返回给主函数，主函数则向标准输出打印结果。

## 工作原理

lli工具命令执行LLVM bitcode格式程序，它使用LLVM bitcode格式作为输入并且使用即时编译器（JIT）执行。当然，如果当前的架构不存在JIT编译器，会用解释器执行。

如果lli能够采用JIT编译器，那么它能高效地使用所有代码生成器参数，如llc。

## 另请参阅

- 第3章为语言增加JIT支持并扩展前端和增加JIT支持部分。

# 使用C语言前端——Clang

本节将展示Clang前端的不同用途。

## 准备工作

你需要先安装Clang工具。

## 详细步骤

Clang可以用作高层编译器驱动，让我们来看一个样例。

1. 创建一个C语言的hello world，文件名是test.c：

```
$ cat test.c
#include<stdio.h>
int main() {
printf("hello world\n");
return 0; }
```

2. 使用Clang作为编译器驱动，编译得到可执行文件a.out，执行即可得到预期结果：

```
$ clang test.c
$ ./a.out
hello world
```

这里创建了C语言文件test.c，我们用Clang编译之后就得到可执行文件，将得到期望的结果。

3. 除此之外，Clang也能用作预处理器，只需要增加-E参数。下面的样例中，C语言代码中用#define定义了一个宏MAX，其值为100，用

来作为即将创建的数组的长度：

```
$ cat test.c
#define MAX 100
void func() {
    int a[MAX];
}
```

4. 使用以下命令调用预处理器，在标准输出中输出结果：

```
$ clang test.c -E
# 1 "test.c"
# 1 "<built-in>" 1
# 1 "<built-in>" 3
# 308 "<built-in>" 3
# 1 "<command line>" 1
# 1 "<built-in>" 2
# 1 "test.c" 2
void func() {
    int a[100];
}
```

在test.c文件中，本书之后的内容中也将使用该文件，定义了MAX为100，因此MAX在预处理中被替换之后，a[MAX]就变成了a[100]。

5. 你能用下面的命令打印前面样例中test.c文件的抽象语法树，在标准输出中输出结果：

```
| $ clang -cc1 test.c -ast-dump
TranslationUnitDecl 0x3f72c50<<invalid sloc>><invalid sloc>
|-TypedefDecl 0x3f73148<<invalid sloc>><invalid sloc> implicit
  __int128_t '__int128'
|-TypedefDecl 0x3f731a8<<invalid sloc>><invalid sloc> implicit
  __uint128_t 'unsigned __int128'
|-TypedefDecl 0x3f73518<<invalid sloc>><invalid sloc> implicit
  __builtin_va_list '__va_list_tag [1]'
`-FunctionDecl 0x3f735b8<test.c:3:1, line:5:1> line:3:6 func
  'void ()'
    `-CompoundStmt 0x3f73790<col:13, line:5:1>
      `-DeclStmt 0x3f73778<line:4:1, col:11>
        `-VarDecl 0x3f73718<col:1, col:10> col:5 a 'int [100]'
```

这里的-cc1参数保证了只运行编译器前端，而不是编译器驱动，它输出了test.c文件代码的AST。

6. 你也可以用下面的命令来为前面样例中的test.c文件生成LLVM汇编码：

```
$ clang test.c -S -emit-llvm -o -
; ModuleID = 'test.c'
target datalayout = "e-m:e-i64:64-f80:128-n8:16:32:64-S128"
target triple = "x86_64-unknown-linux-gnu"

; Function Attrs: nounwind uwtable
define void @func() #0 {
%a = alloca [100 x i32], align 16
ret void
}
```

-S参数和-emit-llvm参数保证为test.c代码生成LLVM汇编码。

7. 为了得到用于相同test.c测试码的机器码，需要给Clang传递-S参数。如果你使用了-o -参数，则会在标准输出中输出结果：

```
$ clang -S test.c -o -
.text
.file "test.c"
.globl func
.align 16, 0x90
.type func,@function
func:          # @func
    .cfi_startproc
# BB#0:
    pushq %rbp
.Ltmp0:
    .cfi_def_cfa_offset 16
.Ltmp1:
    .cfi_offset %rbp, -16
    movq %rsp, %rbp
.Ltmp2:
    .cfi_def_cfa_register %rbp
    popq %rbp
    retq
.Ltmp3:
    .size func, .Ltmp3-func
```

```
| .cfi_endproc
```

在只使用-S参数的情况下，编译器会在代码生成的过程中产生机器码。这里使用了-o -参数，因此执行命令后机器码直接输出到了标准输出。

## 工作原理

在之前的样例中，Clang能够作为预处理器、编译器驱动、前端以及代码生成器使用，因此它的输出取决于你指定的参数。

## 另请参阅

- 这里简单介绍了如何使用Clang，而还有很多参数可以传递给Clang，对应了不同的功能。如果想要看到它的所有参数，可以执行clang的—help命令。

# 使用GO语言前端

llgo编译器是基于LLVM的仅用Go语言写的Go语言前端，用它可以把Go语言程序编译成LLVM 汇编码。

## 准备工作

你需要下载llgo二进制文件或者通过源码来构建llgo，并且把它的路径添加到PATH环境变量中。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 创建Go源码文件，如通过llgo生成LLVM汇编码。创建test.go：

```
$ cat test.go
package main
import "fmt"
func main() {
    fmt.Println("Test Message")
}
```

2. 然后用llgo获得LLVM汇编码：

```
$ llgo -dump test.go
; ModuleID = 'main'
target datalayout = "e-p:64:64:64..."
target triple = "x86_64-unknown-linux"
%0 = type { i8*, i8* }
...
```

# 工作原理

llgo编译器是Go语言的前端，它用test.go程序作为输入，输出 LLVM IR。

## 另请参阅

- 关于llgo的源码下载及安装步骤，请参见<https://github.com/go-llvm/llgo>。

# 使用DragonEgg

DragonEgg是一个GCC插件，它使得GCC能够使用LLVM优化器和代码生成器来取代GCC自己的优化器和代码生成器。

## 准备工作

你需要GCC 4.5及以上版本，目标机器为x86-32/x86-64以及ARM处理器。当然，也需要下载DragonEgg源码并构建dragonegg.so动态链接库文件。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 创建一个简单的hello world程序：

```
$ cat testprog.c
#include<stdio.h>
int main() {
printf("hello world");
}
```

2. 用GCC来编译这个程序，这里使用的是gcc-4.5：

```
$ gcc testprog.c -S -O1 -o -
.file" testprog.c"
.section.rodata.str1.1,"aMS",@progbits,1
.LC0:
.string"Hello world!"
.text
.globl main
```

```

.type main, @function
main:
    subq $8, %rsp
    movl $.LC0, %edi
    call puts
    movl $0, %eax
    addq $8, %rsp
    ret
.size main, .-main

```

3. 在gcc命令行中使用-fplugin=path/dragonegg.so参数，来让GCC调用LLVM的优化器和代码生成器：

```

$ gcc testprog.c -S -O1 -o - -fplugin=./dragonegg.so
    .file "testprog.c"
# Start of file scope inline assembly
    .ident "GCC: (GNU) 4.5.0 20090928 (experimental) LLVM:
82450:82981"
# End of file scope inline assembly

.text
.align 16
.globl main
.type main,@function
main:
    subq $8, %rsp
    movl $.L.str, %edi
    call puts
    xorl %eax, %eax
    addq $8, %rsp
    ret
.size main, .-main
.type .L.str,@object
.section
.rodata.str1.1,"aMS",@progbits,1
.L.str:
    .asciz "Hello world!"
    .size .L.str, 13
.section .note.GNU-stack,"",@progbits

```

另请参阅

- 关于DragonEgg源码下载及安装，请参见<http://dragonegg.llvm.org/>。

---

[1]在编译器的设计中，静态单赋值形式是一种特殊形式的中间码——每个变量仅被赋值一次。——译者注

[2]sysroot：通常指的是系统的根目录，例如Linux系统的根目录为/。有时我们可以通过修改sysroot来改变程序的安装路径。——译者注

# 第2章 实现编译器前端

本章涵盖以下话题。

- 定义TOY语言
- 实现词法分析器
- 定义抽象语法树
- 实现语法分析器
- 解析简单表达式
- 解析二元表达式
- 为解析编写驱动
- 对TOY语言进行词法分析和语法分析
- 为每个AST类定义IR代码生成方法
- 为表达式生成IR代码
- 为函数生成IR代码
- 增加IR优化支持

# 概述

本章将展示如何为一门语言写一个编译器前端。我们使用自定义的语言TOY，为其编写词法分析器和语法分析器，以及使用前端从**AST (Abstract Syntax Tree)**生成IR代码。

# 定义TOY语言

在实现词法分析器和语法分析器之前，我们首先需要定义这门语言的语法。本章将通过TOY语言来展示如何实现词法分析器和语法分析器。本节的目的是展示一门语言的基本特性。出于这个目的，TOY语言比较简单但具有一定意义。

通常来说，一门编程语言会有一些变量、函数调用、常量等。为了让事情简单一点，我们考虑实现的TOY语言只包含32位的整型常量类型A，以及不需要声明类型的变量（像Python一样，与C/C++/Java这样需要类型声明的静态语言相反）。

## 详细步骤

语法通过如下的推导规则来定义：非终结符号<sup>①</sup>（nonterminal-symbol）在左边（Left Hand Side——LHS），终结符号<sup>②</sup>（terminal-symbol）和非终结符的组合在右边（Right Hand Side——RHS）；当遇到一个LHS，就会根据推导规则生成与之对应的RHS。

1. 一个算术表达式可以是一个数字常量：

```
numeric_expr := number
```

2. 括号表达式会在左右括号之间包含一个表达式：

```
paran_expr := '(' expression ')' 
```

3. 一个标识符（identifier）表达式会是一个标识符或者函数调用：

```
identifier_expr  
:= identifier  
:= identifier '(' expr_list ')' 
```

4. 如果标识符`_expr`是函数调用，它要么没有参数，要么有一个由逗号分隔的参数列表：

```
expr_list
:= (empty)
:= expression (',' expression)*
```

5. 另外还有一些基本表达式，它们可以是标识符表达式、算术表达式，或者括号表达式，语法会从基本表达式开始展开。

```
primary := identifier_expr
:= numeric_expr
:= paran_expr
```

6. 一个表达式可以是一个二元表达式：

```
expression := primary binoprhs
```

7. 一个RHS二元运算则是二元运算符和表达式的组合：

```
binoprhs := ( binoperator primary )*
binoperators := '+'-'/'*'//'
```

8. 函数声明具有如下的语法：

```
func_decl := identifier '(' identifier_list ')'
identifier_list := (empty)
                  := (identifier)*
```

9. 函数定义使用`def`关键字，其后是函数声明和定义了函数体的表达式：

```
function_defn := 'def' func_decl expression
```

10. 最后，需要一个顶层的表达式，以生成所有种类的表达式：

```
toplevel_expr := expression
```

基于以上定义的语法，TOY语言可以写出这样一个样例：

```
def foo (x , y)  
x +y * 16
```

既然我们已经定义了语法，那么接下来就是为其写一个词法分析器和语法分析器。

# 实现词法分析器

词法分析往往是编译程序的第一步。词法分析器把程序代码的输入流切分成token，而语法分析器则接受这些token并把token流构建成AST（抽象语法树）。通常来说，被解析成token的语言是基于上下文无关语法<sup>[4]</sup>的。一个token可以是一个字符串，由一个或多个同一范畴的字符组成。对输入字符流构建成token的过程称为符号化（tokenization）。为了把输入的字符分组成token，还需要有特定的定界符。对于词法分析来说，有自动化的词法分析工具来完成这个工作，比如LEX。而我们接下来展示的TOY词法分析器，则是采用C++语言来手动实现的。

## 准备工作

我们必须对本节定义的TOY语言有一个基本的了解。首先创建一个toy.cpp文件：

```
$ vim toy.cpp
```

接下来的代码涵盖了词法分析、语法分析、代码生成的逻辑。

## 详细步骤

实现词法分析器的时候，需要确定token的类型来对输入字符串流进行分类（与自动机中的状态相似），而这些类型可以用**enumeration**（enum）来表示。

1. 打开toy.cpp文件<sup>[4]</sup>:

```
$ vim toy.cpp
```

## 2. 在toy.cpp文件中编写enum:

```
enum Token_Type {  
    EOF_TOKEN = 0,  
    NUMERIC_TOKEN,  
    IDENTIFIER_TOKEN,  
    PARAN_TOKEN,  
    DEF_TOKEN  
};
```

下面是以上代码的术语表:

- EOF\_TOKEN: 它规定文件的结束。
- NUMERIC\_TOKEN: 当前token是数值类型的。
- IDENTIFIER\_TOKEN: 当前token是标识符。
- PARAN\_TOKEN: 当前token是括号。
- DEF\_TOKEN: 当前token是def声明，之后是函数定义。

## 3. 为了持有数值，需要在toy.cpp文件中定义一个静态变量:

```
static int Numeric_Val;
```

## 4. 为了持有Identifier字符串名字，还需要在toy.cpp文件中定义一个静态变量:

```
static std::string Identifier_string;
```

## 5. 现在通过在toy.cpp文件中使用一些诸如isspace()、isalpha()和fgetc()之类的C语言库函数定义词法分析函数，如下:

```
static int get_token() {  
    static int LastChar = ' ';  
  
    while(isspace(LastChar))  
        LastChar = fgetc(file);  
  
    if(isalpha(LastChar)) {  
        Identifier_string = LastChar;
```

```

while(isalnum((LastChar = fgetc(file))))
Identifier_string += LastChar;

if(Identifier_string == "def")
return DEF_TOKEN;
return IDENTIFIER_TOKEN;
}

if(isdigit(LastChar)) {
std::string NumStr;
do {
    NumStr += LastChar;
    LastChar = fgetc(file);
} while(isdigit(LastChar));

Numeric_Val = strtod(NumStr.c_str(), 0);
return NUMERIC_TOKEN;
}

if(LastChar == '#') {
do LastChar = fgetc(file);
while(LastChar != EOF && LastChar != '\n'
&& LastChar != '\r');

if(LastChar != EOF) return get_token();
}

if(LastChar == EOF) return EOF_TOKEN;

int ThisChar = LastChar;
LastChar = fgetc(file);
return ThisChar;
}

```

## 工作原理

之前定义的TOY语言样例如下：

```

def foo (x , y)
x + y * 16

```

词法分析器会以这个程序为输入。在遇到def关键字之后，判断出

接下来会是函数定义的token，因此返回枚举值DEF\_TOKEN。然后会遇到函数定义以及参数。接着是一个有两个二元操作符、两个变量、一个数值常量组成的表达式。在下一节会展示采用何种数据结构来保存这些数据。

## 另请参阅

- 关于更加复杂、详细的[手写C++词法分析器](http://clang.llvm.org/doxygen/Lexer_8cpp_source.html)，可以参见Clang的词法分析器，[http://clang.llvm.org/doxygen/Lexer\\_8cpp\\_source.html](http://clang.llvm.org/doxygen/Lexer_8cpp_source.html)。

# 定义抽象语法树

抽象语法树（以下简称AST）是一门编程语言源码的抽象语法结构的树形表示。各种语言组件，例如表达式、条件控制语句等，都有相应的AST，并被区分为操作符和操作数。AST并不表示这些代码如何由语法生成，而是表达了语言组件之间的关系。AST忽略了一些无关紧要的元素，例如标点符号、定界符（通常是空格、换行）。另外，AST中的每个元素都会有一些附加的属性，在之后的编译阶段会有一定作用。例如，源码行号信息就是这样一个属性，在进行语法检查遇到语法错误时就可以输出错误代码的行号信息（在C++的Clang前端中，位置、行号、列号等信息以及其他相关属性由SourceManager类的一个对象存储）。

AST的使用集中在语义分析阶段，在这个阶段，编译器会检查程序和语言元素是否正确使用。此外，在语义分析阶段编译器还会基于AST生成符号表。完整的树遍历允许验证程序的正确性。在验证正确后，AST还是代码生成的基础。

## 准备工作

在生成AST之时，我们需要运行词法分析器来得到token。我们即将要解析的语言由表达式、函数定义、函数声明组成，而表达式又有多种类型，包括变量、二元运算符、数值表达式等。

## 详细步骤

为了定义AST结构，执行以下步骤。

1. 打开toy.cpp文件：

```
$ vim toy.cpp
```

以下是词法分析器代码，定义了AST。

2. 首先定义一个base类解析表达式：

```
class BaseAST {  
public :  
    virtual ~BaseAST();  
};
```

还需要定义几个派生类来解析每一种类型的表达式。

3. 变量表达式的AST类定义如下：

```
class VariableAST : public BaseAST{  
    std::string Var_Name;  
    // 定义string对象用作存储变量名  
    public:  
        VariableAST (std::string &name) : Var_Name(name) {}  
    // 变量AST类的含参构造函数由传入构造函数的字符串初始化  
};
```

4. 语言会包含一些数值表达式。数值表达式的AST类定义如下：

```
class NumericAST : public BaseAST {  
    int numeric_val;  
    public :  
        NumericAST (intval) :numeric_val(val) {}  
};
```

5. 对于由二元运算组成的表达式，AST类定义如下：

```
Class BinaryAST : public BaseAST {  
    std::string Bin_Operator; // 用于存储二元运算符的string对象  
    BaseAST *LHS, *RHS; // 用于存储一个二元表达式的LHS和RHS的对象。  
    // 由于LHS和RHS二元操作可以是任何类型，因此用BaseAST对象存储。  
    public:  
        BinaryAST (std::string op, BaseAST *lhs, BaseAST *rhs ) :  
            Bin_Operator(op), LHS(lhs), RHS(rhs) {}  
    // 初始化二元运算符、二元表达式的LHS和RHS
```

```
};
```

6. 用于函数声明的AST类定义如下：

```
class FunctionDeclAST {  
    std::string Func_Name;  
    std::vector<std::string> Arguments;  
public:  
    FunctionDeclAST(const std::string &name, const  
        std::vector<std::string> &args) :  
        Func_Name(name), Arguments(args) {};  
};
```

7. 用于函数定义的AST类定义如下：

```
class FunctionDefnAST {  
    FunctionDeclAST *Func_Decl;  
    BaseAST* Body;  
public:  
    FunctionDefnAST(FunctionDeclAST *proto, BaseAST *body) :  
        Func_Decl(proto), Body(body) {}  
};
```

8. 用于函数调用的AST类定义如下：

```
class FunctionCallAST : public BaseAST {  
    std::string Function_Callee;  
    std::vector<BaseAST*> Function_Arguments;  
public:  
    FunctionCallAST(const std::string &callee, std::vector<BaseAST*>  
        &args) :  
        Function_Callee(callee), Function_Arguments(args) {}  
};
```

到这里，AST的基本框架已经基本可用。

## 工作原理

关于由词法分析器得到的token的各种信息由AST这一数据结构来存储，这些信息包含在语法分析器的逻辑当中，并且根据当前解析的token类型来填充AST。

## 另请参阅

- 在生成AST之后，我们会实现语法分析器，在此之后我们会展示调用语法分析器和词法分析器的样例。关于Clang使用的C++ AST结构的详细信息，请参见  
<http://clang.llvm.org/docs/IntroductionToTheClangAST.html>。

# 实现语法分析器

语法分析器（parser）根据语言的语法规则来解析代码，解析阶段决定了输入的代码是否能够根据既定的语法组成token流<sup>[5]</sup>。在此阶段会构造出一棵解析树，而语法分析器则会定义一些函数来把代码组织成一种被称为AST的数据结构。本节定义的解析器采用了递归下降的解析技术自顶向下解析，并用相互递归的函数构建AST。

## 准备工作

我们需要自定义的语言，本例中是TOY语言，以及由词法分析器得到的token流。

## 详细步骤

在TOY的语法分析器中定义一些基本的变量来持有上下文信息：

1. 打开toy.cpp文件：

```
$ vim toy.cpp
```

2. 定义持有当前token（来自词法分析器）的静态全局变量：

```
static int Current_token;
```

3. 定义一个函数从词法分析器的输入流获得下一个token，如下：

```
static void next_token() {
    Current_token = get_token();
}
```

4. 下一步需要使用前一节定义的AST数据结构，为解析表达式定义函数。

5. 定义一个泛型函数，来根据由词法分析器确定的token类型调用特定解析函数，如下：

```
static BaseAST* Base_Parser() {
    switch (Current_token) {
        default: return 0;
        case IDENTIFIER_TOKEN : return identifier_parser();
        case NUMERIC_TOKEN : return numeric_parser();
        case '(' : return paran_parser();
    }
}
```

## 工作原理

输入流被词法分析器构建成token流并传递给语法分析器。Current\_token持有当前处理的token。在这一阶段token的类型是已知的，并根据其类型来调用相应的解析函数来初始化AST。

## 另请参阅

- 在下面几节中，我们会学习如何解析不同的表达式。关于Clang使用的C++解析技术的详细内容，请参见  
[http://clang.llvm.org/doxygen/classclang\\_1\\_1Parser.html](http://clang.llvm.org/doxygen/classclang_1_1Parser.html)。

# 解析简单的表达式

本节介绍如何解析简单的表达式。一个简单的表达式由数值、标识符、函数调用、函数声明和函数定义组成。对于每一种类型的表达式，需要定义独立的解析逻辑。

## 准备工作

我们需要自定义的语言（本例中是TOY语言）以及从词法分析器生成的token流。在此之前我们已经定义了AST，所以在这里只要解析表达式并且为每种类型的表达式调用相应的AST构造函数即可。

## 详细步骤

执行以下的代码来解析简单的表达式。

1. 打开toy.cpp文件：

```
$ vi toy.cpp
```

在toy.cpp文件中已经完成了词法分析的逻辑，其他的代码需要写在词法分析后面。

2. 定义如下的parser函数来解析数值表达式：

```
static BaseAST *numeric_parser() {
    BaseAST *Result = new NumericAST(Numeric_Val);
    next_token();
    return Result;
}
```

3. 定义parser函数来解析标识符表达式。需要注意的是，标识符可以是变量引用，或者是函数调用。它们之间通过函数调用会由括号这一特征来区分。实现如下：

```
static BaseAST* identifier_parser() {
    std::string IdName = Identifier_string;

    next_token();

    if(Current_token != '(')
        return new VariableAST(IdName);

    next_token();

    std::vector<BaseAST*> Args;
    if(Current_token != ')') {
        while(1) {
            BaseAST* Arg = expression_parser();
            if(!Arg) return 0;
            Args.push_back(Arg);

            if(Current_token == ')') break;

            if(Current_token != ',')
                return 0;
            next_token();
        }
    }
    next_token();

    return new FunctionCallAST(IdName, Args);
}
```

4. 定义如下的parser函数来解析函数声明：

```
static FunctionDeclAST *func_decl_parser() {
    if(Current_token != IDENTIFIER_TOKEN)
        return 0;

    std::string FnName = Identifier_string;
    next_token();

    if(Current_token != '(')
        return 0;
```

```

    std::vector<std::string> Function_Argument_Names;
    while(next_token() == IDENTIFIER_TOKEN)
        Function_Argument_Names.push_back(Identifier_string);
    if(Current_token != ')')
        return 0;

    next_token();
    return new FunctionDeclAST(FnName, Function_Argument_Names);
}

```

5. 定义如下的parser函数来解析函数定义：

```

static FunctionDefnAST *func_defn_parser() {
    next_token();
    FunctionDeclAST *Decl = func_decl_parser();
    if(Decl == 0) return 0;

    if(BaseAST* Body = expression_parser())
        return new FunctionDefnAST(Decl, Body);
    return 0;
}

```

需要注意，这个函数调用了前面代码中的expression\_parser来解析表达式，其函数定义如下：

```

static BaseAST* expression_parser() {
    BaseAST *LHS = Base_Parser();
    if(!LHS) return 0;
    return binary_op_parser(0, LHS);
}

```

## 工作原理

如果遇到一个数值token，那么调用数值表达式的构造函数并由解析器返回数值的AST对象，用数值数据填充数值AST。

而标识符表达式也与此类似，解析的数据可以是变量或者函数调

用。对于函数声明和定义来说，函数名和函数参数被分别解析，接着调用相应AST类的构造函数。

# 解析二元表达式

本节介绍如何解析二元表达式。

## 准备工作

我们需要自定义的语言（本例中是TOY语言），以及由词法分析器生成token流。二元表达式的解析器在按顺序决定LHS和RHS的时候需要知道二元运算符的优先级，而这可以用STL中的map来表示。

## 详细步骤

执行以下步骤以解析二元表达式。

1. 打开toy.cpp文件：

```
$ vi toy.cpp
```

2. 在toy.cpp文件的全局作用域内声明一个map来存储运算符优先级：

```
static std::map<char, int>Operator_Precidence;
```

这里展示的TOY语言有4个运算符，并具有以下的优先级：

```
-< +< /< *
```

3. 还需要一个初始化优先级的函数，即把优先级数值存储在map中，也定义在toy.cpp的全局作用域内：

```

static void init_precedence() {
    Operator_Precedence['-'] = 1;
    Operator_Precedence['+'] = 2;
    Operator_Precedence['/'] = 3;
    Operator_Precedence['*'] = 4;
}

```

4. 一个辅助函数，以返回已定义的二元运算符的优先级，定义如下：

```

static int getBinOpPrecedence() {
    if(!isascii(Current_token))
        return -1;

    int TokPrec = Operator_Precedence[Current_token];
    if(TokPrec<= 0) return -1;
    return TokPrec;
}

```

5. 现在，可以定义解析binary运算符的解析器了：

```

static BaseAST* binary_op_parser(int Old_Prec, BaseAST *LHS) {
    while(1) {
        int Operator_Prec = getBinOpPrecedence();
        if(Operator_Prec< Old_Prec)
            return LHS;

        int BinOp = Current_token;
        next_token();

        BaseAST* RHS = Base_Parser();
        if(!RHS) return 0;

        int Next_Prec = getBinOpPrecedence();
        if(Operator_Prec< Next_Prec) {
            RHS = binary_op_parser(Operator_Prec+1, RHS);
            if(RHS == 0) return 0;
        }

        LHS = new BinaryAST(std::to_string(BinOp), LHS, RHS);
    }
}

```

在这里，当前运算符的优先级和之前运算符的优先级一起被检查，输出则取决于二元运算符的LHS和RHS。需要注意的是，二元运算符解析器是递归调用的，因为RHS可以是一个表达式，而不只是一个单独的标识符。

6. 括号的parser函数定义如下：

```
static BaseAST* paran_parser() {
    next_token();
    BaseAST* V = expression_parser();
    if (!V) return 0;

    if(Current_token != ')')
        return 0;
    return V;
}
```

7. 定义一些高层函数来封装这些parser函数，定义如下：

```
static void HandleDefn() {
    if (FunctionDefnAST *F = func_defn_parser()) {
        if(Function* LF = F->Codegen()) {
        }
    }
    else {
        next_token();
    }
}

static void HandleTopExpression() {
    if(FunctionDefnAST *F = top_level_parser()) {
        if(Function *LF = F->Codegen()) {
        }
    }
    else {
        next_token();
    }
}
```

另请参阅

- 本章接下来的几节都是关于自定义对象解析的。关于C++表达式解析的详细内容，请参见  
[http://clang.llvm.org/doxygen/classclang\\_1\\_1Parser.html](http://clang.llvm.org/doxygen/classclang_1_1Parser.html)。

# 为解析编写驱动

本节介绍如何在TOY解析器的主函数中调用解析函数，即为解析函数编写驱动。

## 详细步骤

为了调用驱动程序以开始解析，需要定义如下的驱动函数。

1. 打开toy.cpp文件：

```
$ vi toy.cpp
```

2. Driver函数由主函数调用，解析器定义如下：

```
static void Driver() {
    while(1) {
        switch(Current_token) {
            case EOF_TOKEN : return;
            case ';' : next_token(); break;
            case DEF_TOKEN : HandleDefn(); break;
            default : HandleTopExpression(); break;
        }
    }
}
```

3. 运行整个程序的main()函数定义如下：

```
int main(int argc, char* argv[]) {
    LLVMContext &Context = getGlobalContext();
    init_precedence();
    file = fopen(argv[1], "r");
    if(file == 0) {
        printf("Could not open file\n");
    }
    next_token();
```

```
Module_0b = new Module("my compiler", Context);
Driver();
Module_0b->dump();
return 0;
}
```

## 工作原理

主函数负责调用词法分析器和语法分析器，二者都作用于输入编译器前端的代码段。在主函数中，会调用驱动函数，开始解析输入代码。

## 另请参阅

- 关于Clang中解析C++语言的主函数和驱动函数的详细内容，请参见  
[http://llvm.org/viewvc/llvm-project/cfe/trunk/tools/driver/cc1\\_main.cpp](http://llvm.org/viewvc/llvm-project/cfe/trunk/tools/driver/cc1_main.cpp)。

# 对TOY语言进行词法分析和语法分析

既然已经为TOY语言语法定义了完整的词法分析器和语法分析器，下面可以开始用TOY语言运行样例了。

## 准备工作

你需要对TOY语言的语法有所了解，以及本章前几节的预备知识。

## 详细步骤

执行以下的步骤用TOY语言来运行并测试词法分析器和语法分析器。

1. 首先编译toy.cpp程序，得到可执行文件：

```
$ clang++ toy.cpp -O3 -o toy
```

2. 得到的toy可执行文件即是TOY编译器的前端，准备解析的toy语言文件是example文件：

```
$ cat example
def foo(x , y)
x + y * 16
```

3. 将文件名作为参数传递给toy编译器处理：

```
$ ./toy example
```

# 工作原理

TOY编译器会以读模式打开example文件，并且将单词组织成token流。如果遇到def关键字即返回DEF\_TOKEN，然后调用HandleDefn()函数，它会存储函数名和参数。程序会递归地检查token的类型，然后调用特定的token处理函数，把信息存储在各自的AST中。

## 另请参阅

- 上述的词法分析器和语法分析器仅仅处理了少量无关紧要的语法错误。为了实现错误处理，请参见  
<http://llvm.org/docs/tutorial/LangImpl2.html#parser-basics>。

# 为每个AST类定义IR代码生成方法

现在所有必要信息都存储于AST这一数据结构中，下一阶段即是从AST生成LLVM IR。在代码生成的过程中我们需要使用LLVM的API，通过LLVM内建的API可以生成预定义格式的LLVM IR。

## 准备工作

你需要为输入的任意TOY语言代码创建AST。

## 详细步骤

为了生成LLVM IR，我们需要在每个AST类定义一个CodeGen虚函数（AST类在前面的AST相关章节已经定义过，这些函数需要另外添加到这些类中），实现如下：

1. 打开toy.cpp文件：

```
$ vi toy.cpp
```

2. 在之前定义的BaseAST类，以及它的子类中添加Codegen()函数：

```
class BaseAST {  
    ...  
    ...  
    virtual Value* Codegen() = 0;  
};  
class NumericAST : public BaseAST {  
    ...  
    ...  
    virtual Value* Codegen();  
};
```

```
class VariableAST : public BaseAST {  
    ...  
    ...  
    virtual Value* Codegen();  
};
```

我们定义的每一个AST类都需要包含Codegen()函数。

这一函数返回值是LLVM Value对象，它表示了静态单赋值（SSA）对象。在Codegen过程中还需要定义几个静态对象。

3. 在全局作用域中声明如下的静态变量：

```
static Module *Module_0b;  
static IRBuilder<> Builder(getContext());  
static std::map<std::string, Value*> Named_Values;
```

## 工作原理

Module\_0b模块包含了代码中的所有函数和变量。

Builder对象帮助生成LLVM IR并且记录程序的当前点，以插入 LLVM 指令。另外，Builder对象有创建新指令的函数。

Named\_Valuesmap对象记录当前作用域中的所有已定义值，充当符号表的功能。对我们的TOY语言来说，这个map也会包含函数参数信息。

# 为表达式生成IR代码

本节将展示如何使用编译器前端来为表达式生成IR代码。

## 详细步骤

为了实现TOY语言的LLVM IR代码生成器，需要执行以下步骤。

1. 打开toy.cpp文件：

```
$ vi toy.cpp
```

2. 为数值变量生成代码的函数定义如下：

```
Value *NumericAST::Codegen() {
    return ConstantInt::get(Type::getInt32Ty(getGlobalContext()),
    numeric_val);
}
```

在LLVM IR中，整数常量由ConstantInt类表示，它的值由APInt类持有。

3. 为变量表达式生成代码的函数定义如下：

```
Value *VariableAST::Codegen() {
    Value *V = Named_Values[Var_Name];
    return V ? V : 0;
}
```

4. 二元表达式的Codegen()函数定义如下：

```
Value *BinaryAST::Codegen() {
    Value *L = LHS->Codegen();
    Value *R = RHS->Codegen();
```

```
if(L == 0 || R == 0) return 0;

switch(atoi(Bin_Operator.c_str())) {
    case '+': return Builder.CreateAdd(L, R, "addtmp");
    case '-': return Builder.CreateSub(L, R, "subtmp");
    case '*': return Builder.CreateMul(L, R, "multmp");
    case '/': return Builder.CreateUDiv(L, R, "divtmp");
    default : return 0;
}
}
```

如果上面的代码生成了多个addtmp变量，LLVM会自动为每一个addtmp添加递增的、唯一的数值后缀加以区分。

## 另请参阅

- 下一节将展示如何为函数生成IR代码，以及代码生成的详细步骤。

# 为函数生成IR代码

本节介绍如何为函数生成IR代码。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 函数调用的Codegen()函数定义如下：

```
Value *FunctionCallAST::Codegen() {
    Function *CalleeF =
        Module_0b->getFunction(Function_Callee);
    std::vector<Value*>ArgsV;
    for(unsigned i = 0, e = Function.Arguments.size();
        i != e; ++i) {
        ArgsV.push_back(Function.Arguments[i]->Codegen());
        if(ArgsV.back() == 0) return 0;
    }
    return Builder.CreateCall(CalleeF, ArgsV, "calltmp");
}
```

解析函数调用时，会递归地对其传递的参数调用Codegen()函数，最后创建LLVM调用指令。

2. 既然函数调用的Codegen()函数已经定义，是时候为函数声明和函数定义实现Codegen()函数了。

函数声明的Codegen()函数定义如下：

```
Function *FunctionDeclAST::Codegen() {
    std::vector<Type*>Integers(Arguments.size(), Type::getInt32Ty(g
tGlobalContext()));
    FunctionType *FT = FunctionType::get(Type::getInt32Ty(getGlobal
ontext()), Integers, false);
    Function *F = Function::Create(FT, Function::ExternalLinkage,
```

```

Func_Name, Module_0b);

if(F->getName() != Func_Name) {
    F->eraseFromParent();
    F = Module_0b->getFunction(Func_Name);

    if(!F->empty()) return 0;
    if(F->arg_size() != Arguments.size()) return 0;

}

unsigned Idx = 0;
for(Function::arg_iterator Arg_It = F->arg_begin(); Idx != Arguments.size(); ++Arg_It, ++Idx) {
    Arg_It->setName(Arguments[Idx]);
    Named_Values[Arguments[Idx]] = Arg_It;
}

return F;
}

```

函数定义的Codegen()函数定义如下：

```

Function *FunctionDefnAST::Codegen() {
    Named_Values.clear();

    Function *TheFunction = Func_Decl->Codegen();
    if(TheFunction == 0) return 0;

    BasicBlock *BB = BasicBlock::Create(getContext(), "entry",
TheFunction);
    Builder.SetInsertPoint(BB);

    if(Value *RetVal = Body->Codegen()) {
        Builder.CreateRet(RetVal);
        verifyFunction(*TheFunction);
        return TheFunction;
    }

    TheFunction->eraseFromParent();
    return 0;
}

```

3. 好了，LLVM IR已经准备好了！这些Codegen()函数会被解析顶层表达式的包装函数调用，定义如下：

```

static void HandleDefn() {
    if (FunctionDefnAST *F = func_defn_parser()) {
        if(Function* LF = F->Codegen()) {
        }
    }
    else {
        next_token();
    }
}
static void HandleTopExpression() {
    if(FunctionDefnAST *F = top_level_parser()) {
        if(Function *LF = F->Codegen()) {
        }
    }
    else {
        next_token();
    }
}

```

所以，在成功解析之后，相应的Codegen()函数会被调用以生成 LLVM IR。而dump()函数则会被调用以输出生成的IR。

## 工作原理

Codegen()函数使用了LLVM内建的函数调用来生成IR，因此需要引入这些头文件： llvm/IR/Verifier.h、 llvm/IR/DerivedTypes.h、 llvm/IR/IRBuilder.h、 llvm/IR/LLVMContext.h和llvm/IR/Module.h。

1. 在编译的时候，这些代码需要链接到LLVM库中，因此llvm-config工具能够派上用场：

```
llvm-config --cxxflags --ldflags --system-libs --libs core
```

2. 因此toy程序也需要重新编译，并添加一些额外的参数：

```
$ clang++ -O3 toy.cpp `llvm-config --cxxflags --ldflags --system-libs --libs core` -o toy
```

3. 当toy编译器在example程序上运行的时候，它会生成如下的 LLVM IR:

```
$ ./toy example

define i32 @foo (i32 %x, i32 %y) {
    entry:
        %multmp = mul i32 %y, 16
        %addtmp = add i32 %x, %multmp
        ret i32 %addtmp
}
```

另一个示例程序example2包含一个函数调用：

```
$ cat example2
foo(5, 6);
```

会得到如下的LLVM IR:

```
$ ./toy example2
define i32 @1 () {
    entry:
        %calltmp = call i32@foo(i32 5, i32 6)
        ret i32 %calltmp
}
```

## 另请参阅

- 关于Clang中用C++编写的Codegen()函数的详细信息，请参见 <http://llvm.org/viewvc/llvm-project/cfe/trunk/lib/CodeGen/>。

# 增加IR优化支持

LLVM提供了多种多样的优化Pass，并且允许第三方编译器实现来决定使用哪些优化，及优化的顺序等。本节介绍如何增加IR优化支持。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 在增加IR优化支持之前，先定义一个静态变量来管理函数，如下：

```
static FunctionPassManager *Global_FP;
```

2. 然后需要为之前使用的Module对象定义一个函数Pass管理器，定义于main()函数中：

```
FunctionPassManager My_FP(TheModule);
```

3. 现在可以在main()函数中增加一系列的多种优化Pass了：

```
My_FP.add(createBasicAliasAnalysisPass());  
My_FP.add(createInstructionCombiningPass());  
My_FP.add(createReassociatePass());  
My_FP.add(createGVNPass());  
My_FP.doInitialization();
```

4. 现在把这一系列Pass赋值给全局静态函数Pass管理器[\[6\]](#)：

```
Global_FP = &My_FP;  
Driver();
```

这个PassManager有一个名为run的方法，我们可以在函数定义的

Codegen()返回之前运行这个方法生成IR。展示如下：

```
Function* FunctionDefnAST::Codegen() {
    Named_Values.clear();
    Function *TheFunction = Func_Decl->Codegen();
    if (!TheFunction) return 0;
    BasicBlock *BB = BasicBlock::Create(getContext(), "entry"
TheFunction);
    Builder.SetInsertPoint(BB);
    if (Value* Return_Value = Body->Codegen()) {
        Builder.CreateRet(Return_Value);
        verifyFunction(*TheFunction);
        Global_FP->run(*TheFunction);
        returnTheFunction;
    }
    TheFunction->eraseFromParent();
    return 0;
}
```

这样的优化有许多优势，因为它就地（*inplace*）改变函数体，即直接改进函数体生成的代码，而不会进行复制。

## 另请参阅

- 关于如何增加自定义的优化Pass及其run方法将会在之后的章节演示。

---

**[1]**非终结符号：在形式语言中，非终结符号指的是，根据推导规则，可以被其他符号替换的符号。——译者注

**[2]**终结符号：在形式语言中，终结符号是语言的基本符号，它不可以被分解或替换。也就是说推导到终结符号时推导过程便终结了。——译者注

**[3]**上下文无关语法：Context-Free Grammar (CFG)， $X \geq Y$ ， $X$ 可以被 $Y$ 替换，而无须考虑 $X$ 的上下文，在这里 $X$ 是一个非终结符。与之

对应的是上下文相关语法， $aX \geq Y$ ,  $bX \geq Z$ ，在不同的推导规则中X具有不同的语义，因此称之为上下文相关语法。——译者注

[4]这里使用vim编辑器，你也可以采用其他的。——译者注

[5]原文为a string of tokens，译者认为原文可能存在错误，应为a stream of tokens，故根据上下文译成token流。——译者注

[6]原文为把全局静态函数Pass管理器复制给当前的管理器，译者根据代码纠正此处错误。——译者注

# 第3章 扩展前端并增加JIT支持

本章涵盖以下话题。

- 处理条件控制结构——if/then/else结构
- 生成循环结构
- 处理自定义二元运算符
- 处理自定义一元运算符
- 增加JIT支持

# 概述

在第2章中，我们已经实现了一门语言的前端组件的基本框架，包括为不同类型的表达式定义token，实现一个词法分析器来把代码构建成token流，定义了各种类型表达式的AST，实现了语法分析器，并且为语言生成了LLVM IR代码。另外，我们也展示了如何在前端调用各种优化器。

但是这时候TOY语言还不够完备，因为它还不具备基本的控制流和循环，只有具备了这些，它才算得上强大并具有表现力。JIT支持则探讨了在运行时即时编译代码的可能性。本章将讨论这些更加复杂的语言特性及其实现，这些特性增强了TOY语言，使得TOY语言更加实用、更加强大。本章的几节展示了如何为一门给定的语言增加这些特性。

# 处理条件控制结构——if/then/else结构

对于任何编程语言来说，如果它能够基于一定的条件执行一条语句，那么这会给这门语言带来非常强大的优势。语言中常见的条件控制结构如if/then/else，赋予了一门语言能够根据特定条件修改程序控制流的能力。If语句表示条件，如果条件为真，则执行then结构之后的语句，否则执行else结构之后的语句。本节介绍了解析if/then/else结构以及为其解析和生成代码的一些基本方法。

## 准备工作

TOY语言的if/then/else定义如下：

```
if x< 2 then
x + y
else
x - y
```

为了检查条件，至少需要一个比较运算符。这里使用了“<”，一个简单的小于运算符。为了处理 <，需要在init\_precedence()函数中定义运算符的优先级，如下：

```
static void init_precedence() {
    Operator_Precidence['<'] = 0;
    ...
    ...
}
```

同样，针对二元表达式的Codegen()函数也需要做修改，以处理<操作符：

```
Value* BinaryAST::Codegen() {
    ...
    ...
}
```

```

...
case '<' :
L = Builder.CreateICmpULT(L, R, "cmptmp");
return Builder.CreateZExt(L, Type::getInt32Ty(getContext())
                           "booltmp");...
...
}

```

现在，LLVM IR将生成一个比较指令及布尔指令作为比较结果，而比较结果则会决定程序的控制流。有了以上的基础，我们现在可以处理if/then/else模式了。

## 详细步骤

执行以下步骤。

- 为了处理if/then/else结构，toy.cpp文件中的词法分析器需要扩展。首先在enum类型中增加一种token类型：

```

enum Token_Type{
...
...
IF_TOKEN,
THEN_TOKEN,
ELSE_TOKEN
}

```

- 然后在get\_token()函数中增加这些token的条目，它们匹配字符串并返回相应的token：

```

static int get_token() {
...
...
if(Identifier_string == "def") return DEF_TOKEN;
if(Identifier_string == "if") return IF_TOKEN;
if(Identifier_string == "then") return THEN_TOKEN;
if(Identifier_string == "else") return ELSE_TOKEN;
...
}

```

```
...  
}
```

3. 接着在toy.cpp文件中定义AST节点：

```
class ExprIfAST : public BaseAST {  
    BaseAST *Cond, *Then, *Else;  
public:  
    ExprIfAST(BaseAST *cond, BaseAST *then, BaseAST * else_st)  
        : Cond(cond), Then(then), Else(else_st) {}  
    Value *Codegen() override;  
};
```

4. 接着为if/then/else结构定义解析逻辑：

```
static BaseAST *If_parser() {  
    next_token();  
  
    BaseAST *Cond = expression_parser();  
    if (!Cond)  
        return 0;  
  
    if (Current_token != THEN_TOKEN)  
        return 0;  
    next_token();  
  
    BaseAST *Then = expression_parser();  
    if (Then == 0)  
        return 0;  
  
    If (Current_token != ELSE_TOKEN)  
        return 0;  
  
    next_token();  
  
    BaseAST *Else = expression_parser();  
    if (!Else)  
        return 0;  
  
    return new ExprIfAST(Cond, Then, Else);  
}
```

解析逻辑倒是很简单：首先查找if token，以及解析紧随其后的条件表达式。之后是标识then token，以及解析true条件表达式；最后是查找

else token和解析false条件表达式。

5. 还需要把之前定义的函数和Base\_Parser()连接在一起：

```
static BaseAST* Base_Parser() {
switch(Current_token) {
...
...
...
case IF_TOKEN : return If_parser();
...
}
```

6. 既然if/then/else结构的AST已经被语法分析器填充了表达式，接下来就是为其生成LLVM IR了，让我们来定义Codegen()函数：

```
Value *ExprIfAST::Codegen() {
    Value *Condtn = Cond->Codegen();
    if (Condtn == 0)
        return 0;
    Condtn = Builder.CreateICmpNE(
        Condtn, Builder.getInt32(0), "ifcond");

    Function *TheFunc = Builder.GetInsertBlock()->getParent();

    BasicBlock *ThenBB =
        BasicBlock::Create(getContext(), "then", TheFunc);
    BasicBlock *ElseBB = BasicBlock::Create(getContext(),
"else");
    BasicBlock *MergeBB = BasicBlock::Create(getContext(),
"ifcont");

    Builder.CreateCondBr(Condtn, ThenBB, ElseBB);

    Builder.SetInsertPoint(ThenBB);

    Value *ThenVal = Then->Codegen();
    if (ThenVal == 0)
        return 0;
    Builder.CreateBr(MergeBB);
    ThenBB = Builder.GetInsertBlock();

    TheFunc->getBasicBlockList().push_back(ElseBB);
    Builder.SetInsertPoint(ElseBB);
```

```

Value *ElseVal = Else->Codegen();
if (ElseVal == 0)
    return 0;

Builder.CreateBr(MergeBB);
ElseBB = Builder.GetInsertBlock();

TheFunc->getBasicBlockList().push_back(MergeBB);
Builder.SetInsertPoint(MergeBB);
PHINode *Phi = Builder.CreatePHI(Type::getInt32Ty(getContext()), 2, "iftmp");

Phi->addIncoming(ThenVal, ThenBB);
Phi->addIncoming(ElseVal, ElseBB);
return Phi;
}

```

代码已经就绪，让我们编译一下，在包含if/then/else结构的样例程序上编译和运行。

## 工作原理

执行以下步骤。

1. 编译toy.cpp文件：

```
$ g++ -g toy.cpp `llvm-config --cxxflags --ldflags --system-libs --libs core` -O3 -o toy
```

2. 打开样例文件：

```
$ vi example
```

3. 在样例文件中编写一段包含if/then/else结构的代码：

```
def fib(x)
  if x < 3 then
```

```
1
Else
fib(x-1)+fib(x-2);
```

#### 4. 用TOY编译器去编译样例文件：

```
$ ./toy example
```

if/then/else结构代码生成的LLVM IR如下：

```
; ModuleID = 'my compiler'
target  datalayout  =  "e-m:e-p:32:32-f64:32:64-f80:32-n8:16:32-
S128"

define i32 @fib(i32 %x) {
entry:
%cmptmp = icmp ult i32 %x, 3
br i1 %cmptmp, label %ifcont, label %else

else:                                     ; pr
%subtmp = add i32 %x, -1
%calltmp = call i32 @fib(i32 %subtmp)
%subtmp1 = add i32 %x, -2
%calltmp2 = call i32 @fib(i32 %subtmp1)
%addtmp = add i32 %calltmp2, %calltmp
br label %ifcont

ifcont:                                     ; pr
%else
%iftmp = phi i32 [ %addtmp, %else ], [ 1, %entry ]
ret i32 %iftmp
}
```

得到的输出如下：



解析器会识别if/then/else结构以及根据条件真假执行的相应语句，将数据存储于AST中，以构建AST。之后代码生成器会把AST转成 LLVM IR，条件语句随之生成。无论条件为真还是假，都会生成IR，而具体执行哪一个相应的分支，则取决于执行时条件变量的状态。

## 另请参阅

- 关于Clang如何处理C++语言的if else语句的一些具体样例，请参见 [http://clang.llvm.org/doxygen/classclang\\_1\\_1IfStmt.html](http://clang.llvm.org/doxygen/classclang_1_1IfStmt.html)。

# 生成循环结构

循环结构使得语言能够多次执行相同的任务，却只需要有限的几行代码，这是一种强有力特性，因此几乎所有的语言都会有循环结构。本节将为TOY语言实现循环结构。

## 准备工作

循环结构通常需要先初始化一个归纳变量，然后对这个变量做更新（增加或减少其数值），以及一个表示循环结束的终止条件。因此我们的TOY语言的循环结构定义如下：

```
for i = 1, i < n, 1 in
    x + y;
```

初始化表达式是 $i = 1$ ，终止条件是 $i < n$ ，第1行代码表示 $i$ 以1为步长递增。

只要终止条件为真，循环就不会终止；每次迭代，归纳变量 $i$ 会增加1。这里牵涉一个有趣的东西叫**PHI**节点，它会选择来自不同分支的 $i$ ，因为我们的IR是**SSA**（**single static assignment**，静态单赋值）形式的。在控制流图中，一个给定的变量可以来自两个不同的基本块（两条不同的路径），为了在SSA形式的LLVM IR中表达这种分支情况，需要用**phi**指令，举个例子：

```
%i = phi i32 [ 1, %entry ], [ %nextvar, %loop ]
```

这里的IR表明变量*i*的值可能会来自两个基本块：*%entry*或者*%loop*。来自*%entry*块的变量值是1，而*%nextvar*变量将来自*%loop*。在为TOY编译器实现循环结构之后会来查看这些细节。

# 详细步骤

就像任何其他的表达式一样，循环也需要在词法分析器中通过包含的状态来处理，定义持有循环变量的AST数据结构，以及定义语法分析器和Codegen()函数来生成LLVM IR：

1. 首先在toy.cpp文件的词法分析器中定义token：

```
enum Token_Type {  
    ...  
    ...  
    FOR_TOKEN,  
    IN_TOKEN  
    ...  
    ...  
};
```

2. 然后实现词法分析的逻辑：

```
static int get_token() {  
    ...  
    ...  
    if(Identifier_string == "else")  
        return ELSE_TOKEN;  
    if (Identifier_string == "for")  
        return FOR_TOKEN;  
    if (Identifier_string == "in")  
        return IN_TOKEN;  
    ...  
    ...  
}
```

3. 接着为for循环定义AST：

```
class ExprForAST : public BaseAST {  
    std::string Var_Name;  
    BaseAST *Start, *End, *Step, *Body;  
  
public:  
    ExprForAST (const std::string &varname, BaseAST *start, BaseAST
```

```

*end,
        BaseAST *step, BaseAST *body)
    : Var_Name(varname), Start(start), End(end), Step(step),
Body(body) {}
    Value *Codegen() override;
};

```

4. 然后为循环结构定义解析逻辑：

```

static BaseAST *For_parser() {
    next_token();

    if (Current_token != IDENTIFIER_TOKEN)
        return 0;

    std::string IdName = Identifier_string;
    next_token();

    if (Current_token != '=')
        return 0;
    next_token();

    BaseAST *Start = expression_parser();
    if (Start == 0)
        return 0;
    if (Current_token != ',')
        return 0;
    next_token();

    BaseAST *End = expression_parser();
    if (End == 0)
        return 0;

    BaseAST *Step = 0;
    if (Current_token == ',') {
        next_token();
        Step = expression_parser();
        if (Step == 0)
            return 0;
    }
    if (Current_token != IN_TOKEN)
        return 0;
    next_token();

    BaseAST *Body = expression_parser();
    if (Body == 0)

```

```

        return 0;

    return new ExprForAST (IdName, Start, End, Step, Body);
}

```

## 5. 再定义Codegen()函数生成LLVM IR:

```

Value *ExprForAST::Codegen() {
    Value *StartVal = Start->Codegen();
    if (StartVal == 0)
        return 0;

    Function *TheFunction = Builder.GetInsertBlock()->getParent();
    BasicBlock *PreheaderBB = Builder.GetInsertBlock();
    BasicBlock *LoopBB =
        BasicBlock::Create(getContext(), "loop", TheFunction)

    Builder.CreateBr(LoopBB);

    Builder.SetInsertPoint(LoopBB);
    PHINode *Variable = Builder.CreatePHI(Type::getInt32Ty(getContext()), 2, Var_Name.c_str());
    Variable->addIncoming(StartVal, PreheaderBB);

    Value *OldVal = Named_Values[Var_Name];
    Named_Values[Var_Name] = Variable;

    if (Body->Codegen() == 0)
        return 0;

    Value *StepVal;
    if (Step) {
        StepVal = Step->Codegen();
        if (StepVal == 0)
            return 0;
    } else {
        StepVal = ConstantInt::get(Type::getInt32Ty(getContext()), 1);
    }

    Value *NextVar = Builder.CreateAdd(Variable, StepVal,
"nextvar");

    Value *EndCond = End->Codegen();
    if (EndCond == 0)
        return EndCond;
}

```

```

EndCond = Builder.CreateICmpNE(
    EndCond, ConstantInt::get(Type::getInt32Ty(getContext()), 0), "loopcond");

BasicBlock *LoopEndBB = Builder.GetInsertBlock();
BasicBlock *AfterBB =
    BasicBlock::Create(getContext(), "afterloop",
TheFunction);

Builder.CreateCondBr(EndCond, LoopBB, AfterBB);

Builder.SetInsertPoint(AfterBB);

Variable->addIncoming(NextVar, LoopEndBB);

if (OldVal)
    Named_Values[Var_Name] = OldVal;
else
    Named_Values.erase(Var_Name);

return Constant::getNullValue(Type::getInt32Ty(getContext()));
}

```

## 工作原理

执行以下步骤。

1. 编译toy.cpp文件:

```
$ g++ -g toy.cpp `llvm-config --cxxflags --ldflags --system-libs --libs core` -O3 -o toy
```

2. 打开样例文件:

```
$ vi example
```

3. 在样例文件中编写以下包含for循环的代码:

```
def printstar(n x)
  for i = 1, i < n, 1.0 in
    x + 1
```

4. 用TOY编译器来编译样例文件：

```
$ ./toy example
```

5. 前面的for循环代码会生成以下的LLVM IR:

```
; ModuleID = 'my compiler'
target datalayout = "e-m: e-p:32:32-f64:32:64-f80:32-n8:16:32-S128"

define i32 @printstar(i32 %n, i32 %x) {
entry:
  br label $loop

loop:           ; preds = %loop,
%entry
  %i = phi i32 [1, %entry], [ %nextvar, %loop]
  %nextvar = add i32 %i, 1
  %cmptmp = icmp ult i32 %i, %n
  br i1 %cmptmp, label %loop, label %afterloop

afterloop:      ; preds = %loop
  Ret i32 0
}
```

解析器会识别循环结构，包括初始化归纳变量、终止条件，以及归纳变量的步长值和循环体。然后它会像之前做的那样，把块转成LLVM IR。

之前已经提到，phi指令会从两个基本块%entry和%loop得到变量i的两个值。在之前的例子中，%entry块表示在循环初始化时对i赋值为1；而%loop块对i的值进行更新，完成循环的一次迭代。

另请参阅

- 关于Clang是如何实现C++的循环结构，请参见  
<http://llvm.org/viewvc/llvm-project/cfe/trunk/lib/Parse/ParseExprCXX.cpp>。

# 处理自定义二元运算符

用户自定义运算符和C++中运算符重载的概念相似，一个默认的运算符被修改用于多种多样的对象。通常来说，运算符会是一元或者二元运算符。在现存的架构下实现二元运算符是相对轻松的，但一元运算符需要一些额外的代码来处理。所以我们先定义二元运算符的重载，之后再考虑一元运算符的重载。

## 准备工作

自定义运算符的第一步是定义重载的二元运算符，我们用|（逻辑或运算符）作为样例，TOY语言中的运算符是这样使用的：

```
def binary | (LHS RHS)
if LHS then
1
else if RHS then
1
else
0;
```

从这段代码可以看出，只要LHS或者RHS任何一个不为0，那么就返回1。如果LHS和RHS都为null，则返回0。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 首先像往常一样，是为二元运算符增加enum类型，如果遇到binary关键字就返回相应的枚举类型：

```

enum Token_Type {
    ...
    ...
    BINARY_TOKEN
}
static int get_token() {
    ...
    ...
    if (Identifier_string == "in") return IN_TOKEN;
    if (Identifier_string == "binary") return BINARY_TOKEN;
    ...
    ...
}

```

2. 然后需要为其增加AST。不过在这里不需要定义一个新的AST，只需要修改函数声明的AST就能处理。不过，我们需要为其增加一个标识来表示它是否是二方运算符。如果是运算符，再确定它的优先级：

```

class FunctionDeclAST {
    std::string Func_Name;
    std::vector<std::string> Arguments;
    bool isOperator;
    unsigned Precedence;
public:
    FunctionDeclAST(const std::string &name, const
        std::vector<std::string> &args,
        bool isoperator = false, unsigned prec = 0)
        : Func_Name(name), Arguments(args), isOperator(isoperator),
        Precedence(prec) {}
    bool isUnaryOp() const { return isOperator && Arguments.size()
        == 1; }
    bool isBinaryOp() const { return isOperator && Arguments.size()
        == 2; }

    char getOperatorName() const {
        assert(isUnaryOp() || isBinaryOp());
        return Func_Name[Func_Name.size() - 1];
    }

    unsigned getBinaryPrecedence() const { return Precedence;
}

    Function *Codegen();
};

```

3. 在AST修改好之后，需要修改函数声明的解析器：

```
static FunctionDeclAST *func_decl_parser() {
    std::string FnName;

    unsigned Kind = 0;
    unsigned BinaryPrecedence = 30;

    switch (Current_token) {
    default:
        return 0;
    case IDENTIFIER_TOKEN:
        FnName = Identifier_string;
        Kind = 0;
        next_token();
        break;
    case UNARY_TOKEN:
        next_token();
        if (!isascii(Current_token))
            return 0;
        FnName = "unary";
        FnName += (char)Current_token;
        Kind = 1;
        next_token();
        break;
    case BINARY_TOKEN:
        next_token();
        if (!isascii(Current_token))
            return 0;
        FnName = "binary";
        FnName += (char)Current_token;
        Kind = 2;
        next_token();

        if (Current_token == NUMERIC_TOKEN) {
            if (Numeric_Val < 1 || Numeric_Val > 100)
                return 0;
            BinaryPrecedence = (unsigned)Numeric_Val;
            next_token();
        }
        break;
    }

    if (Current_token != '(')
        return 0;
```

```

    std::vector<std::string> Function_Argument_Names;
    while (next_token() == IDENTIFIER_TOKEN)
        Function_Argument_Names.push_back(Identifier_string);
    if (Current_token != ')')
        return 0;

    next_token();

    if (Kind && Function_Argument_Names.size() != Kind)
        return 0;

    return new FunctionDeclAST(FnName,
        Function_Argument_Names, Kind != 0, BinaryPrecedence);
}

```

#### 4. 接着修改二元AST的Codegen()函数:

```

Value* BinaryAST::Codegen() {
    Value* L = LHS->Codegen();
    Value* R = RHS->Codegen();
    switch(Bin_Operator) {
        case '+': return Builder.CreateAdd(L, R, "addtmp");
        case '-': return Builder.CreateSub(L, R, "subtmp");
        case '*': return Builder.CreateMul(L, R, "multmp");
        case '/': return Builder.CreateUDiv(L, R, "divtmp");
        case '<':
            L = Builder.CreateICmpULT(L, R, "cmptmp");
            return Builder.CreateUIToFP(L, Type::getIntTy(getContext())
                "booltmp");
        default:
            break;
    }
    Function *F = TheModule->getFunction(std::string("binary") + Op);
    Value *Ops[2] = { L, R };
    return Builder.CreateCall(F, Ops, "binop");
}

```

#### 5. 最后需要修改函数声明, 定义如下:

```

Function* FunctionDefnAST::Codegen() {
    Named_Values.clear();
    Function *TheFunction = Func_Decl->Codegen();
    if (!TheFunction) return 0;
    if (Func_Decl->isBinaryOp())
        Operator_Precedence [Func_Decl->getOperatorName()] = Func_

```

```
Decl->getBinaryPrecedence();
BasicBlock *BB = BasicBlock::Create(getContext(), "entry",
TheFunction);
Builder.SetInsertPoint(BB);
if (Value* Return_Value = Body->Codegen()) {
    Builder.CreateRet(Return_Value);
...
...
}
```

## 工作原理

执行以下步骤。

1. 编译toy.cpp文件:

```
$ g++ -g toy.cpp `llvm-config --cxxflags --ldflags --system-
libs --libs core` -O3 -o toy
```

2. 打开样例文件:

```
$ vi example
```

3. 在样例文件中写下包含二元运算符重载的代码:

```
def binary| 5 (LHS RHS)
if LHS then
  1
else if RHS then
  1
else
  0;
```

4. 使用TOY编译器来编译样例文件:

```
$ ./toy example
```

**output :**

```
; ModuleID = 'my compiler'
target  datalayout   = "e-m:e-p:32:32-f64:32:64-f80:32-n8:16:32-
S128"
define i32 @"binary|(i32 %LHS, i32 %RHS) {
entry:
%ifcond = icmp eq i32 %LHS, 0
%ifcond1 = icmp eq i32 %RHS, 0
%. = select i1 %ifcond1, i32 0, i32 1
%iftmp5 = select i1 %ifcond, i32 %., i32 1
ret i32 %iftmp5
}
```

我们之前定义的二元运算符以及它的定义会被解析。一旦遇到一个二元运算符，会初始化LHS和RHS，并且执行其函数体，按定义得到相应的结果。在前面的样例中，只要LHS和RHS中的任意一个为非零，结果就是1；如果LHS和RHS都是0，则结果是0。

## 另请参阅

- 关于处理二元运算符的详细样例，请参见<http://llvm.org/docs/tutorial/LangImpl6.html>。

# 处理自定义一元运算符

前一节展示了如何处理自定义二元运算符，但一门语言不仅仅有二元运算符，还会有一元运算符，操作单个的操作数。本节介绍如何处理一元运算符。

## 准备工作

和之前一样，需要先在TOY语言中定义一元运算符，我们用一个简单的！（逻辑非）运算符作为样例，其定义如下：

```
def unary!(v)
  if v then
    0
  else
    1;
```

如果变量v的值是真，则返回0，否则返回1。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 首先在toy.cpp文件中为一元运算符定义enum token:

```
enum Token_Type {
  ...
  ...
  BINARY_TOKEN,
  UNARY_TOKEN
}
```

2. 然后识别一元运算符字符串，返回UNARY\_TOKEN:

```
static int get_token() {  
    ...  
    ...  
    if (Identifier_string == "in") return IN_TOKEN;  
    if (Identifier_string == "binary") return BINARY_TOKEN;  
    if (Identifier_string == "unary") return UNARY_TOKEN;  
    ...  
    ...  
}
```

3. 接着为一元运算符定义AST:

```
class ExprUnaryAST : public BaseAST {  
    char Opcode;  
    BaseAST *Operand;  
public:  
    ExprUnaryAST(char opcode, BaseAST *operand)  
        : Opcode(opcode), Operand(operand) {}  
    virtual Value *Codegen();  
};
```

4. AST已经就绪，再为一元运算符定义一个解析器:

```
static BaseAST *unary_parser() {  
    if (!isascii(Current_token) || Current_token == '(' || Current_  
    token == ',')  
        return Base_Parser();  
  
    int Op = Current_token;  
  
    next_token();  
  
    if (ExprAST *Operand = unary_parser())  
        return new ExprUnaryAST(Op, Operand);  
  
    return 0;  
}
```

5. 下一步是在二元运算符解析器中调用unary\_parser()函数:

```

static BaseAST *binary_op_parser(int Old_Prec, BaseAST *LHS) {

    while (1) {
        int Operator_Prec = getBinOpPrecedence();

        if (Operator_Prec < Old_Prec)
            return LHS;

        int BinOp = Current_token;
        next_token();

        BaseAST *RHS = unary_parser();
        if (!RHS)
            return 0;

        int Next_Prec = getBinOpPrecedence();
        if (Operator_Prec < Next_Prec) {
            RHS = binary_op_parser(Operator_Prec + 1, RHS);
            if (RHS == 0)
                return 0;
        }
        LHS = new BinaryAST(std::to_string(BinOp), LHS, RHS);
    }
}

```

6. 现在从表达式解析器中调用unary\_parser()函数：

```

static BaseAST *expression_parser() {
    BaseAST *LHS = unary_parser();
    if (!LHS)
        return 0;

    return binary_op_parser(0, LHS);
}

```

7. 修改函数声明的解析器：

```

static FunctionDeclAST* func_decl_parser() {
    std::string Function_Name = Identifier_string;
    unsigned Kind = 0;
    unsigned BinaryPrecedence = 30;
    switch (Current_token) {
        default:

```

```

        return 0;
    case IDENTIFIER_TOKEN:
        Function_Name = Identifier_string;
        Kind = 0;
        next_token();
        break;
    case UNARY_TOKEN:
        next_token();
    if (!isascii(Current_token))
        return 0;
        Function_Name = "unary";
        Function_Name += (char)Current_token;
        Kind = 1;
        next_token();
        break;
    case BINARY_TOKEN:
        next_token();
        if (!isascii(Current_token))
            return 0;
        Function_Name = "binary";
        Function_Name += (char)Current_token;
        Kind = 2;
        next_token();
        if (Current_token == NUMERIC_TOKEN) {
            if (Numeric_Val< 1 || Numeric_Val > 100)
                return 0;
            BinaryPrecedence = (unsigned)Numeric_Val;
            next_token();
        }
        break;
    }
    if (Current_token != '(') {
        printf("error in function declaration");
        return 0;
    }
    std::vector<std::string> Function_Argument_Names;
    while(next_token() == IDENTIFIER_TOKEN)
        Function_Argument_Names.push_back(Identifier_string);
    if(Current_token != ')') {
        printf("Expected ')' ");
        return 0;
    }
    next_token();
    if (Kind && Function_Argument_Names.size() != Kind)
        return 0;
    return new FunctionDeclAST(Function_Name, Function_Arguments_
Names, Kind !=0, BinaryPrecedence);
}

```

8. 最后一步是为一元运算符定义Codegen()函数：

```
Value *ExprUnaryAST::Codegen() {
    Value *OperandV = Operand->Codegen();
    if (OperandV == 0) return 0;
    Function *F = TheModule->getFunction(std::string("unary") + Opcode);
    if (F == 0)
        return 0;
    return Builder.CreateCall(F, OperandV, "unop");
}
```

## 工作原理

执行以下步骤。

1. 编译toy.cpp文件：

```
$ g++ -g toy.cpp `llvm-config --cxxflags --ldflags --system-libs --libs core` -O3 -o toy
```

2. 打开样例文件：

```
$ vi example
```

3. 在样例文件中编写包含一元运算符重载的代码：

```
def unary!(v)
    if v then
        0
```

```
else  
1;
```

#### 4. 用TOY编译器编译样例文件：

```
$ ./toy example
```

输出如下：

```
; ModuleID = 'my compiler'  
target  datalayout  =  "e-m:e-p:32:32-f64:32:64-f80:32-n8:16:32-  
S128"  
  
define i32 @"unary!"(i32 %v) {  
entry:  
  %ifcond = icmp eq i32 %v, 0  
  %. = select i1 %ifcond, i32 1, i32 0  
  ret i32 %.  
}
```

用户定义的一元运算符会被识别、解析，然后生成IR。对于这个例子中的一元运算符!，如果操作数非零，那么结果就是0，否则是1。

## 另请参阅

- 关于一元运算符的实现细节，请参见  
<http://llvm.org/docs/tutorial/LangImpl6.html>。

# 增加JIT支持

各种各样的工具可用于LLVM IR。如第1章所示，IR能够转成bitcode或者汇编语言。一个叫作opt的优化工具也能作用于IR。所以我们通常把IR理解为一个通用的平台——这些工具的抽象层。

JIT<sup>■</sup>支持也能在IR上运行。它能立即对输入的顶级表达式进行求值，例如你输入了1+2，它能对代码求值并输出运算结果3。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 在toy.cpp文件中定义一个执行引擎作为全局静态变量：

```
static ExecutionEngine *TheExecutionEngine;
```

2. 在toy.cpp文件的main()函数中增加JIT相关代码：

```
int main() {
...
...
init_precedence();
TheExecutionEngine = EngineBuilder(TheModule).create();
...
...
}
```

3. 在toy.cpp文件中修改顶级表达式的解析器：

```
static void HandleTopExpression() {

if (FunctionDefAST *F = expression_parser())
    if (Function *LF = F->Codegen()) {
        LF -> dump();
```

```
        void *FPtr = TheExecutionEngine->getPointerToFunction(LF);
        int (*Int)() = (int (*)())(intptr_t)FPtr;
        printf("Evaluated to %d\n", Int());
    }
    else
next_token();
}
```

## 工作原理

执行以下步骤。

1. 编译toy.cpp程序：

```
$ g++ -g toy.cpp `llvm-config --cxxflags --ldflags --system-libs --libs core mcjit native` -O3 -o toy
```

2. 打开样例文件：

```
$ vi example
```

3. 在样例文件中编写以下TOY代码：

```
...
4+5;
```

4. 最后，在样例文件中运行TOY编译器：

```
$ ./toy example
```

输出如下。

```
define i32 @0() {
entry:
```

```
    ret i32 9  
}
```

LLVM的JIT编译器匹配本机的ABI平台，它会把得到的指针转成相应类型的函数指针，然后直接调用。JIT编译得到的代码与静态编译链接的本地机器码没有区别。

---

[1]JIT: Just-In-Time，即时编译，在程序运行时将代码翻译成机器码并执行。与之相对的是AOT（Ahead Of Time），它在程序运行之前就将代码编译成机器码。JIT结合了AOT和解释执行的优势，它能够产生高效的机器码，并具备足够的灵活性。——译者注

# 第4章 准备优化

本章涵盖以下话题。

- 多级优化
- 自定义LLVM Pass
- 使用opt工具运行自定义Pass
- 在新的Pass中调用其他Pass
- 使用Pass管理器注册Pass
- 实现一个分析Pass
- 实现一个别名分析Pass
- 使用其他分析Pass

# 概述

在完成对源码的转换之后，就会得到LLVM IR形式的输出，它作为向汇编代码转换的一个公共平台，依赖不同的后端得到不同的汇编码。在转为汇编码之前，如果对IR进行优化就可以得到执行效率更高的代码。LLVM IR是基于SSA形式的，这也就意味着对每个变量的赋值都会产生一个新的变量，或者说变量是不可变的，这是SSA表示的一种经典样例。

在LLVM的架构中，Pass的作用是优化LLVM IR。Pass作用于 LLVM IR，处理IR，分析IR，寻找优化的机会并修改IR产生优化的代码。命令行工具opt就是用来在LLVM IR上运行各种优化Pass的。

接下来的章节中会讨论多种优化技术，也包括如何编写和注册一个新的优化Pass。

# 多级优化

通常编译器的优化会有多种级别，从0~3（也有s通常用作空间优化），优化级别越高，代码得到的优化也越多。让我们来看看不同的优化级别。

## 准备工作

通过在LLVM IR上运行opt命令行工具可以帮助理解不同的优化级别。在此之前我们先使用Clang前端将C样例程序转换为IR。

1. 打开example.c文件，编写以下代码：

```
$ vi example.c
int main(int argc, char **argv) {
    int i, j, k, t = 0;
    for(i = 0; i< 10; i++) {
        for(j = 0; j< 10; j++) {
            for(k = 0; k< 10; k++) {
                t++;
            }
        }
        for(j = 0; j< 10; j++) {
            t++;
        }
    }
    for(i = 0; i< 20; i++) {
        for(j = 0; j< 20; j++) {
            t++;
        }
        for(j = 0; j< 20; j++) {
            t++;
        }
    }
    return t;
}
```

2. 然后用Clang命令把源码转成LLVM IR：

```
$ clang -S -O0 -emit-llvm example.c
```

会生成一个包含LLVM IR的example.ll新文件，它将用作展示多种可用的优化级别。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 使用opt命令行工具优化包含生成IR的example.ll文件：

```
$ opt -O0 -S example.ll
```

-O0表示最低的优化级别。

2. 类似地，你可以尝试其他优化级别：

```
$ opt -O1 -S example.ll  
$ opt -O2 -S example.ll  
$ opt -O3 -S example.ll
```

## 工作原理

opt命令行工具使用example.ll文件作为输入，运行优化级别对应的一系列Pass。它也能在同一个优化级别重复运行一些Pass。如果你需要看在每一个优化级别运行了哪些Pass，只需要为之前的opt命令增加--debug-pass=Structure命令行选项。

## 另请参阅

- 关于opt工具能够使用的更多其他选项，请参见  
<http://llvm.org/docs/CommandGuide/opt.html>。

# 自定义LLVM Pass

LLVM实现了一系列的分析和转换Pass，所有的LLVM Pass都是pass类的子类，并且通过覆写了从pass类继承的虚函数以实现其功能。任何一个Pass都是Pass LLVM的实例。

## 准备工作

让我们来看看如何自己写一个Pass。我们把自己的Pass命名为function block counter，运行时它会识别展示函数名，以及对函数中的基本块进行计数。首先我们需要为这个Pass编写一个Makefile，来构建Pass。执行以下步骤，编写Makefile：

1. 在llvm lib/Transform 目录下打开Makefile文件：

```
$ vi Makefile
```

2. 在Makefile中指定LLVM根目录的路径、库的名字，标识模块为可加载，如下：

```
LEVEL = ../../..  
LIBRARYNAME = FuncBlockCount  
LOADABLE_MODULE = 1  
include $(LEVEL)/Makefile.common
```

这个Makefile指定了当前目录的所有.cpp文件都将被编译并链接成为一个动态链接库。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 创建一个名为FuncBlockCount.cpp的.cpp文件:

```
$ vi FuncBlockCount.cpp
```

2. 在文件中引入LLVM的一些头文件:

```
#include "llvm/Pass.h"
#include "llvm/IR/Function.h"
#include "llvm/Support/raw_ostream.h"
```

3. 引入llvm命名空间，以使用其中的LLVM函数:

```
using namespace llvm;
```

4. 创建一个匿名的命名空间:

```
namespace {
```

5. 然后声明Pass:

```
struct FuncBlockCount : public FunctionPass {
```

6. 声明Pass标识符，会被LLVM用作识别Pass:

```
static char ID;
FuncBlockCount() : FunctionPass(ID) {}
```

7. 这是编写Pass最重要的步骤之一——实现run函数，因为这个Pass作用于函数并且继承了FunctionPass类，因此定义runOnFunction函数，在函数上运行:

```
bool runOnFunction(Function &F) override {
    errs() << "Function " << F.getName() << '\n';
    return false;
}
```

这个函数会输出当前处理的函数名。

8. 接下来初始化Pass ID:

```
char FuncBlockCount::ID = 0;
```

9. 最后，需要注册Pass，填写名称、命令行参数：

```
static RegisterPass<FuncBlockCount> X("funcblockcount", "Function Count", false, false);
```

所有代码都完成之后，会像这样：

```
#include "llvm/Pass.h"
#include "llvm/IR/Function.h"
#include "llvm/Support/raw_ostream.h"
using namespace llvm;
namespace {
struct FuncBlockCount : public FunctionPass {
    static char ID;
    FuncBlockCount() : FunctionPass(ID) {}
    bool runOnFunction(Function &F) override {
        errs() << "Function " << F.getName() << '\n';
        return false;
    }
};
char FuncBlockCount::ID = 0;
static RegisterPass<FuncBlockCount> X("funcblockcount",
"Function Block Count", false, false);
```

## 工作原理

只需要简单地使用gmake命令就能编译这个文件，然后在LLVM根目录会得到一个新文件FuncBlockCount.so。这个动态链接库文件能够动态加载到opt工具，然后在LLVM IR代码上运行。至于如何加载并运行，会在下一节展示。

## 另请参阅

- 关于如何从零构建一个Pass，请参见<http://llvm.org/docs/WritingAnLLVMPass.html>。

# 使用**opt**工具运行自定义**Pass**

前一节编写的Pass已经准备好在LLVM IR上运行了，只需要使用**opt**工具动态加载这个Pass，即可识别并运行。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 在sample.c文件中编写C语言测试代码，之后会被编译为.ll文件：

```
$ vi sample.c

int foo(int n, int m) {
    int sum = 0;
    int c0;
    for (c0 = n; c0 > 0; c0--) {
        int c1 = m;
        for (; c1 > 0; c1--) {
            sum += c0 > c1 ? 1 : 0;
        }
    }
    return sum;
}
```

2. 使用以下命令将C语言测试代码编译为LLVM IR：

```
$ clang -O0 -S -emit-llvm sample.c -o sample.ll
```

会生成sample.ll文件。

3. 使用**opt**工具运行新的Pass，如下：

```
$ opt -load (path_to_.so_file)/FuncBlockCount.so -funcblockcount
sample.ll
```

输出如下：

```
Function foo
```

## 工作原理

从之前的代码可以看到，`opt`命令行工具会动态加载动态链接库，以运行`Pass`。之后`Pass`会遍历每一个函数，输出其函数名，但未对`IR`做任何改动。在下一节会展示在新的`Pass`中如何对`IR`做进一步增强。

## 另请参阅

- 关于多种类型的`Pass`类，请参见  
<http://llvm.org/docs/WritingAnLLVMPass.html#pass-classes-and-requirements>。

# 在新的Pass中调用其他Pass

一个Pass可能会需要其他Pass以得到分析数据、启发或类似信息来指导自己的行为。例如，一个Pass可能会需要一些对内存依赖性的分析，或者需要修改过的IR。我们在前一节编写的Pass仅仅是输出了函数名，本节我们会对其增强，使它能够对循环中的基本块进行计数，以介绍如何使用其他Pass的结果。

## 准备工作

前一节编写的代码基本不变，不过还需要另外做一些改动以进行增强，使得它能够在这个IR中对基本块进行计数，在下面将进行展示。

## 详细步骤

getAnalysis函数用于指定要使用的其他Pass。

1. 既然我们实现的Pass要对基本块进行计数，那么它就需要函数的循环信息，可以通过getAnalysis循环函数指定：

```
LoopInfo *LI = &getAnalysis<LoopInfoWrapperPass>().getLoopInfo();
```

2. 上面的代码会调用LoopInfoPass来得到关于循环的信息，通过对这个对象的迭代即可得到基本块信息：

```
unsigned num_Blocks = 0;
Loop::block_iterator bb;
for(bb = L->block_begin(); bb != L->block_end(); ++bb)
    num_Blocks++;
errs() << "Loop level " << nest << " has " << num_Blocks
<< " blocks\n";
```

3. 以上代码会遍历循环，对其中的基本块进行计数。但它只对最外层循环中的基本块计数。如果想要得到内层循环的信息，还需要递归地调用getSubLoops函数进行计数。把逻辑放在单独的函数中，然后递归地调用会更有意义：

```
void countBlocksInLoop(Loop *L, unsigned nest) {
    unsigned num_Blocks = 0;
    Loop::block_iterator bb;
    for(bb = L->block_begin(); bb != L->block_end(); ++bb)
        num_Blocks++;
    errs() << "Loop level " << nest << " has " << num_Blocks
    << " blocks\n";
    std::vector<Loop*> subLoops = L->getSubLoops();
    Loop::iterator j, f;
    for (j = subLoops.begin(), f = subLoops.end(); j != f;
    ++j)
        countBlocksInLoop(*j, nest + 1);
}

virtual bool runOnFunction(Function &F) {
    LoopInfo *LI = &getAnalysis<LoopInfoWrapperPass>().
    getLoopInfo();
    errs() << "Function " << F.getName() + "\n";
    for (Loop *L : *LI)
        countBlocksInLoop(L, 0);
    return false;
}
```

## 工作原理

我们在样例程序上运行新修改的Pass，执行以下步骤来修改并运行样例程序。

1. 打开sample.c文件，用以下代码来替换其内容：

```
int main(int argc, char **argv) {
    int i, j, k, t = 0;
    for(i = 0; i < 10; i++) {
        for(j = 0; j < 10; j++) {
```

```
    for(k = 0; k< 10; k++) {
        t++;
    }
    for(j = 0; j< 10; j++) {
        t++;
    }
}
for(i = 0; i< 20; i++) {
    for(j = 0; j< 20; j++) {
        t++;
    }
    for(j = 0; j< 20; j++) {
        t++;
    }
}
return t;
}
```

2. 用Clang将其转换成.ll文件:

```
$ clang -O0 -S -emit-llvm sample.c -o sample.ll
```

3. 在样例代码上运行新的Pass:

```
$ opt -load (path_to_.so_file)/FuncBlockCount.so -funcblockcount
sample.ll
```

输出如下:

```
Function main
Loop level 0 has 11 blocks
Loop level 1 has 3 blocks
Loop level 1 has 3 blocks
Loop level 0 has 15 blocks
Loop level 1 has 7 blocks
Loop level 2 has 3 blocks
Loop level 1 has 3 blocks
```

更多内容

LLVM的Pass管理器提供了Pass调试选项，因此我们能够看到我们的Pass使用了哪些分析和优化，如下：

```
$ opt -load (path_to_.so_file)/FuncBlockCount.so -  
funcblockcount sample.ll -  
disable-output -debug-pass=Structure
```

# 使用Pass管理器注册Pass

到目前为止，每个Pass都是独立运行的动态链接库文件，而opt工具是由一系列这样的Pass通过Pass管理器注册组成的，作为LLVM的一部分。本节将展示用Pass管理器注册Pass的详细步骤。

## 准备工作

PassManager这个类会接受一个Pass列表，并且保证它们的先决条件正确设置，之后会对它们进行调度以保证高效运行。Pass管理器为了减少一系列Pass的执行时间，主要负责以下两个任务。

- 尽可能在多个Pass间共享分析数据，避免重复计算分析结果。
- 使得Pass执行流水线化，一系列Pass一起流水线化运行，以达到缓存和内存使用行为友好。

## 详细步骤

执行以下步骤使用Pass管理器注册Pass。

1. 在FuncBlockCount.cpp文件中定义DEBUG\_TYPE宏，指定调试名称：

```
#define DEBUG_TYPE "func-block-count"
```

2. 在FuncBlockCount结构体中指定getAnalysisUsage语法：

```
void getAnalysisUsage(AnalysisUsage &AU) const override {
    AU.addRequired<LoopInfoWrapperPass>();
}
```

3. 初始化宏，以初始化新的Pass:

```
INITIALIZE_PASS_BEGIN(FuncBlockCount, "funcblockcount",
                      "Function Block Count", false, false)
INITIALIZE_PASS_DEPENDENCY(LoopInfoWrapperPass)

INITIALIZE_PASS_END(FuncBlockCount, "funcblockcount",
                     "Function Block Count", false, false)
Pass *llvm::createFuncBlockCountPass() { return new
FuncBlockCount(); }
```

4. 在include/llvm/LinkAllPasses.h文件中添加createFuncBlockCount Pass函数:

```
(void) llvm:: createFuncBlockCountPass ();
```

5. 在include/llvm/Transforms/Scalar.h文件中添加声明:

```
Pass * createFuncBlockCountPass ();
```

6. 修改Pass的构造函数:

```
FuncBlockCount() : FunctionPass(ID) {initializeFuncBlockCount
Pass(*PassRegistry::getPassRegistry());}
```

7. 在lib/Transforms/Scalar/Scalar.cpp文件中增加初始化Pass的条目:

```
initializeFuncBlockCountPass (Registry);
```

8. 在include/llvm/InitializePassed.h文件中添加初始化声明:

```
void initializeFuncBlockCountPass (Registry);
```

9. 在lib/Transforms/Scalar/CMakeLists.txt文件中添加FuncBlockCount.cpp文件名:

FuncBlockCount.cpp

# 工作原理

参照第1章的方法，使用cmake命令编译LLVM，Pass管理器会在opt命令行工具的Pass流水线中包含新加入的Pass。同样，这个Pass也能在命令行独立运行：

```
$ opt -funcblockcount sample.ll
```

## 另请参阅

- 关于如何简单地在Pass管理器中添加Pass，请参见LoopInstSimplify Pass：<http://llvm.org/viewvc/llvm-project/llvm/trunk/lib/Transforms/Scalar/LoopInstSimplify.cpp>。

# 实现一个分析Pass

分析Pass在实际不修改IR的情况下提供关于IR的更高级信息，而这些信息可以被其他的分析Pass使用来计算其结果。并且，只要一个分析Pass计算出了结果，这个计算结果可以被不同的Pass多次使用，直到一个Pass改变了这个IR。本节将实现一个分析Pass，来计算并输出一个函数中使用的操作码的数量。

## 准备工作

首先，为我们的Pass编写测试代码：

```
$ cat testcode.c
int func(int a, int b){
    int sum = 0;
    int iter;
    for (iter = 0; iter < a; iter++) {
        int iter1;
        for (iter1 = 0; iter1 < b; iter1++) {
            sum += iter > iter1 ? 1 : 0;
        }
    }
    return sum;
}
```

将它转换为.bc文件，作为分析Pass的输入：

```
$ clang -c -emit-llvm testcode.c -o testcode.bc
```

然后在 llvm\_root\_dir/lib/Transforms/opcodeCounter 目录创建包含 Pass 源码的文件，这里的 opcodeCounter 是我们创建的目录，之后 Pass 的源码都会存在这里。

参照之前的做法，为这个目录创建一个 Makefile 并做必要修改，以编译 Pass。

# 详细步骤

现在开始编写分析Pass的源码。

1. 包含必要的头文件，并使用llvm命名空间：

```
#define DEBUG_TYPE "opcodeCounter"
#include "llvm/Pass.h"
#include "llvm/IR/Function.h"
#include "llvm/Support/raw_ostream.h"
#include<map>
using namespace llvm;
```

2. 为Pass定义CountOpcode结构体：

```
namespace {
struct CountOpcode : public FunctionPass {
```

3. 在结构体中创建必要的数据结构，来计算操作码的数量，以及表示Pass的Pass ID：

```
std::map< std::string, int> opcodeCounter;
static char ID;
CountOpcode () : FunctionPass(ID) {}
```

4. 在前面定义的结构体中，编写Pass的具体实现代码，覆写runOnFunction函数<sup>11</sup>：

```
virtual bool runOnFunction (Function &F) {
    llvm::outs() << "Function " << F.getName () << '\n';
for ( Function::iterator bb = F.begin(), e = F.end(); bb != e; ++bb) {
    for ( BasicBlock::iterator i = bb->begin(), e = bb->end();
        i!= e; ++i) {
        if(opcodeCounter.find(i->getOpcodeName()) ==
        opcodeCounter.end()) {
            opcodeCounter[i->getOpcodeName()] = 1;
        } else {
```

```

        opcodeCounter[i->getOpcodeName()] += 1;
    }
}
}

std::map< std::string, int>::iterator i =
opcodeCounter.begin();
std::map< std::string, int>::iterator e =
opcodeCounter.end();
while (i != e) {
    llvm::outs() << i->first << ":" << i->second << "\n";
    i++;
}
llvm::outs() << "\n";
opcodeCounter.clear();
return false;
}
};
}

```

## 5. 编写代码注册Pass:

```

char CountOpcode::ID = 0;
static RegisterPass<CountOpcode> X("opcodeCounter", "Count
number of opcode in a functions");

```

## 6. 用make或者cmake命令编译Pass。

## 7. 使用opt工具在测试代码上运行Pass，得到函数中使用的操作码的数量信息：

```

$ opt -load path-to-build-folder/lib/LLVMCountopcodes.so
-opcodeCounter -disable-output testcode.bc
Function func
add: 3
alloca: 5
br: 8
icmp: 3
load: 10
ret: 1
select: 1
store: 8

```

# 工作原理

这个分析Pass在函数层级上运行，作用于程序中的每一个函数。因此，我们在声明CountOpcodes : public FunctionPass结构的时候继承了FunctionPass函数。

opcodeCounter函数保存函数中使用的每个操作码的数量。在下面的for循环中，遍历所有函数中的操作码：

```
for (Function::iterator bb = F.begin(), e = F.end(); bb != e;  
++bb) {  
    for (BasicBlock::iterator i = bb->begin(), e = bb->end(); i != e;  
        ++i) {
```

第1层for循环遍历函数中所有的基本块，第2层循环遍历基本块中的每一条指令。

第1层for循环中的代码实际收集操作码并且计数，而循环之后的一段代码则输出结果。由于我们使用map来存储结果，所以只需要在函数中遍历这个map，然后输出每一对操作码的名字以及计数。

由于函数没有修改测试代码中的任何东西，所以返回false。最后两行代码用于以给定的名字注册Pass以便在opt工具中可以使用这个Pass。

最后，在测试代码上执行，就能够得到函数中不同的操作码输出和使用次数了。

# 实现一个别名分析Pass

指针别名分析（Alias Analysis）用于判断是否存在两个指针指向同一个地方，换言之，是否存在一个地址被不同的指针使用。基于别名分析的结果，可以进行进一步优化，例如公共子表达式消除。有许多方法和算法可以进行别名分析。本节不会讲述这些算法，而是会展示LLVM如何为你提供一些基础设施，以编写我们自己的别名分析Pass。本节会编写别名分析的Pass来展示如何开始编写这样的Pass，不会使用特定的算法，而是在每个分析的实例中返回MustAlias作为输出。

## 准备工作

首先编写测试代码以作为别名分析的输入，在这里我们采用前面章节的testcode.c文件作为测试代码。

当然，你还需要修改Makefile，为llvm/lib/Analysis/Analysis.cpp、 llvm/include/llvm/InitializePasses.h、 llvm/include/llvm/LinkAllPasses.h、 llvm/include/llvm/Analysis/Passes.h中的Pass增加条目以注册Pass，在 llvm\_source\_dir/lib/Analysis/目录创建Everything\_MustAlias.cpp文件，其中包含Pass的源码。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 引入必要的头文件，使用llvm命名空间：

```
#include "llvm/Pass.h"
#include "llvm/Analysis/AliasAnalysis.h"
#include "llvm/IR/DataLayout.h"
#include "llvm/IR/LLVMContext.h"
```

```
#include "llvm/IR/Module.h"
using namespace llvm;
```

2. 通过继承ImmutablePass和AliasAnalysis类为Pass创建一个结构:

```
namespace {
struct EverythingMustAlias : public ImmutablePass, public
AliasAnalysis {
```

3. 声明相应的数据结构和构造函数:

```
static char ID;
EverythingMustAlias() : ImmutablePass(ID) {}
initializeEverythingMustAliasPass(*PassRegistry::getPassRegistry());}
```

4. 实现getAdjustedAnalysisPointer函数:

```
void *getAdjustedAnalysisPointer(const void *ID) override {
    if (ID == &AliasAnalysis::ID)
        return (AliasAnalysis*)this;
    return this;
}
```

5. 实现initializePass函数来初始化Pass:

```
bool doInitialization(Module &M) override {
    DL = &M.getDataLayout();
    return true;
}
```

6. 实现alias函数:

```
void *getAdjustedAnalysisPointer(const void *ID) override {
    if (ID == &AliasAnalysis::ID)
        return (AliasAnalysis*)this;
    return this;
};
```

## 7. 注册Pass:

```
char EverythingMustAlias::ID = 0;
INITIALIZE_AG_PASS(EverythingMustAlias, AliasAnalysis, "must-aa",
"Everything Alias (always returns 'must' alias)", true, true,
true)

ImmutablePass *llvm::createEverythingMustAliasPass() { return new
EverythingMustAlias(); }
```

8. 使用make或者cmake命令编译Pass。

9. 在编译Pass得到.so文件之后，使用该文件执行测试代码：

```
$ opt-must-aa -aa-eval -disable-output testcode.bc
===== Alias Analysis Evaluator Report =====
 10 Total Alias Queries Performed
 0 no alias responses (0.0%)
 0 may alias responses (0.0%)
 0 partial alias responses (0.0%)
 10 must alias responses (100.0%)
 Alias Analysis Evaluator Pointer Alias Summary:
0%/0%/0%/100%
 Alias Analysis Mod/Ref Evaluator Summary: no mod/ref!
```

## 工作原理

`AliasAnalysis`类定义了多种别名分析实现所支持的接口，它导出了`AliasResult`和`ModRefResult`枚举类型，分别表示alias和modref查询的结果。

`alias`方法用于检查两个内存对象是否指向相同的地址。它以两个内存对象为输入，相应地返回`MustAlias`、`PartialAlias`、`MayAlias`或者`NoAlias`。

`getModRefInfo`方法返回一条指令的执行是否读取或者修改内存位置的信息。前面样例中的Pass对于每两个指针都会返回`MustAlias`，正如我们所实现的一样。前面的类继承`ImmutablePasses`类，适合我们的

Pass，这是一个很基本的Pass。而继承AliasAnalysisPass，则因为它为我们的实现提供了接口。

getAdjustedAnalysisPointer函数用作多继承场景下一个实现分析接口的Pass。如果有必要，它应当覆写基类的虚函数，对指针进行转型以提供特定Pass的信息。

initializePass函数则用于初始化含有InitializeAliasAnalysis方法的Pass，这个函数会包含别名分析的具体实现。

getAnalysisUsage方法用于声明此Pass对其他Pass的依赖，这通过显式地调用AliasAnalysis::getAnalysisUsage方法来实现。

alias方法之后的代码用作注册Pass。最后测试的时候，我们得到了10个MustAlias响应（100.0%）的结果，正如我们在Pass中所实现的。

## 另请参阅

- 关于LLVM中别名分析的详细信息，请参见 <http://llvm.org/docs/AliasAnalysis.html>。

# 使用其他分析Pass

本节将简要介绍LLVM提供的其他分析Pass，它们可用作分析基本块、函数、模块等信息。除此之外，还将展示LLVM已经实现的Pass，以及如何使用这些Pass来进行其他分析。但本节仅仅介绍一部分Pass，并非所有。

## 准备工作

首先在testcode1.c文件中编写测试代码，用作分析：

```
$ cat testcode1.c
void func() {
    int i;
    char C[2];
    char A[10];
    for(i = 0; i != 10; ++i) {
        ((short*)C)[0] = A[i];
        C[1] = A[9-i];
    }
}
```

使用以下命令行，把C语言代码转换成bitcode格式：

```
$ clang -c -emit-llvm testcode1.c -o testcode1.bc
```

## 详细步骤

执行以下步骤使用其他分析Pass。

1. 使用-aa-eval命令行选项调用opt工具，执行别名分析评估器Pass：

```
$ opt -aa-eval -disable-output testcode1.bc
===== Alias Analysis Evaluator Report =====
36 Total Alias Queries Performed
0 no alias responses (0.0%)
36 may alias responses (100.0%)
0 partial alias responses (0.0%)
0 must alias responses (0.0%)
Alias Analysis Evaluator Pointer Alias Summary: 0%/100%/0%/0%
Alias Analysis Mod/Ref Evaluator Summary: no mod/ref!
```

2. 使用-print-dom-info命令行选项调用opt工具，打印支配者树(dominator-tree)：

```
$ opt -print-dom-info -disable-output testcode1.bc
-----
Inorder Dominator Tree:
[1] %0 {0,9}
[2] %1 {1,8}
[3] %4 {2,5}
[4] %19 {3,4}
[3] %22 {6,7}
```

3. 使用-count-aa命令行选项调用opt工具，对一个Pass向其他Pass的别名分析查询进行计数：

```
$ opt -count-aa -basicaa -licm -disable-output testcode1.bc
No alias: [4B] i32* %i, [1B] i8* %7
No alias: [4B] i32* %i, [2B] i16* %12
No alias: [1B] i8* %7, [2B] i16* %12
No alias: [4B] i32* %i, [1B] i8* %16
Partial alias: [1B] i8* %7, [1B] i8* %16
No alias: [2B] i16* %12, [1B] i8* %16
Partial alias: [1B] i8* %7, [1B] i8* %16
No alias: [4B] i32* %i, [1B] i8* %18
No alias: [1B] i8* %18, [1B] i8* %7
No alias: [1B] i8* %18, [1B] i8* %16
Partial alias: [2B] i16* %12, [1B] i8* %18
Partial alias: [2B] i16* %12, [1B] i8* %18

===== Alias Analysis Counter Report =====
Analysis counted:
12 Total Alias Queries Performed
8 no alias responses (66%)
```

```
0 may alias responses (0%)
4 partial alias responses (33%)
0 must alias responses (0%)
Alias Analysis Counter Summary: 66%/0%/33%/0%
```

#### 0 Total Mod/Ref Queries Performed

4. 使用-print-alias-sets命令行选项调用opt工具，输出程序中的别名集合：

```
$ opt-basicaa -print-alias-sets -disable-output testcode1.bc
Alias Set Tracker: 3 alias sets for 5 pointer values.
  AliasSet[0x336b120, 1] must alias, Mod/Ref Pointers: (i32*
%i, 4)
  AliasSet[0x336b1c0, 2] may alias, Ref Pointers: (i8*
%7, 1), (i8* %16, 1)
  AliasSet[0x338b670, 2] may alias, Mod Pointers: (i16*
%12, 2), (i8* %18, 1)
```

## 工作原理

在第1个实例中，我们使用-aa-eval选项，opt工具执行了别名分析评估器Pass，并在屏幕上输出分析结果。它遍历函数中的每对指针，以查询它们是否互为别名。

在第2个实例中，使用-print-dom-info选项，执行输出支配者树的Pass，获得支配者树的信息。

在第3个实例中，执行opt -count-aa -basicaa -licm命令。count-aa命令选项表示由licmPass对basicaa Pass的查询次数。这个信息通过opt工具的别名分析计数（count alias analysis）Pass来获得。

最后一个实例是输出程序中的别名集合，使用- print-alias-sets命令行选项，它输出了用basicaa Pass分析得到的别名集合。

## 另请参阅

关于更多这里未提及的Pass, 请参见  
<http://llvm.org/docs/Passes.html#analysis-passes>。

---

[1]原文为overload, 译者根据代码, 纠正为覆写。——译者注

# 第5章 实现优化

本章涵盖以下话题。

- 编写无用代码消除Pass
- 编写内联转换Pass
- 编写内存优化Pass
- 合并LLVM IR
- 循环的转换与优化
- 表达式重组
- IR向量化
- 其他优化Pass

# 概述

在第4章中，我们看到了如何在LLVM中编写一个Pass，也以别名分析为例，展示了如何编写一些分析Pass。这些Pass只是读入源码，然后给我们一些关于代码的信息。在本章中，我们会更进一步编写转换Pass对源码做实际修改，以尝试对代码进行优化，达到更高的执行效率。前两节会介绍如何实现转换Pass，以及它如何改变代码。在这之后，我们会看到如何对Pass的代码进行改变，以增强Pass的行为。

# 编写无用代码消除Pass

本节介绍如何对程序进行无用代码消除优化（dead code elimination）。无用代码消除意味着任何对源程序输出的执行结果没有影响的代码都会被消除。执行这一优化的主要原因是缩小程序大小，无用代码被阻止执行，进而提高代码质量，使得代码更容易调试，以及减少程序运行时间。本节展示一个无用代码消除的变种，被称为入侵式无用代码消除，它首先假定所有的代码都是无用的，然后证明它们是有用的。我们会亲自实现这个Pass，看看我们需要如何修改，让它能够像 LLVM 代码库里 lib/Transforms/Scalar 目录下的其他 Pass 一样运行。

## 准备工作

为了展示无用代码消除的实现，我们需要一段测试代码，在此之上运行入侵式无用代码消除Pass：

```
$ cat testcode.ll
declare i32 @strlen(i8*) readonly nounwind
define void @test() {
  call i32 @strlen( i8* null )
  ret void
}
```

在测试代码中，`test` 函数调用了 `strlen` 函数，却没有使用它的返回值。因此我们的 Pass 认为对 `strlen` 函数的调用是无用的。

文件中包含 `llvm/InitializePasses.h` 头文件，在 `llvm` 命名空间中添加我们即将编写的 Pass 的条目：

```
namespace llvm {
...
...
void initializeMYADCEPass(PassRegistry&); //添加这一行
```

在include/llvm-c/scalar.h/Transform/scalar.h文件下添加Pass的条目：

```
void LLVMAddMYAggressiveDCEPass(LLVMPassManagerRef PM);
```

在include/llvm/Transform/scalar.h文件中，在llvm命名空间添加Pass的条目：

```
FunctionPass *createMYAggressiveDCEPass();
```

在lib/Transforms/Scalar/scalar.cpp文件的两个地方添加Pass的条目，并在void llvm::initializeScalarOpts(PassRegistry &Registry)函数中添加如下代码：

```
initializeMergedLoadStoreMotionPass(Registry); //已存在于文件
initializeMYADCEPass(Registry); //增加此行
initializeNaryReassociatePass(Registry); //已存在于文件
...
...
void LLVMAddMemcpyOptPass(LLVMPassManagerRef PM) {
    unwrap(PM)->add(createMemcpyOptPass());
}
// 增加以下代码
void LLVMAddMYAggressiveDCEPass(LLVMPassManagerRef PM) {
    unwrap(PM)->add(createMYAggressiveDCEPass());
}
void LLVMAddPartiallyInlineLibCallsPass(LLVMPassManagerRef PM) {
    unwrap(PM)->add(createPartiallyInlineLibCallsPass());
}
...
```

## 详细步骤

现在编写Pass的代码。

1. 引入必要的头文件：

```
#include "llvm/Transforms/Scalar.h"
```

```

#include "llvm/ADT/DepthFirstIterator.h"
#include "llvm/ADT/SmallPtrSet.h"
#include "llvm/ADT/SmallVector.h"
#include "llvm/ADT/Statistic.h"
#include "llvm/IR/BasicBlock.h"
#include "llvm/IR/CFG.h"
#include "llvm/IR/InstIterator.h"
#include "llvm/IR/Instructions.h"
#include "llvm/IR/IntrinsicInst.h"
#include "llvm/Pass.h"
using namespace llvm;

```

## 2. 声明Pass的结构体:

```

namespace {
struct MYADCE : public FunctionPass {
    static char ID; // Pass identification, replacement for
    typeid
    MYADCE() : FunctionPass(ID) {
        initializeMYADCEPass(*PassRegistry::getPassRegistry());
    }
    bool runOnFunction(Function& F) override;
    void getAnalysisUsage(AnalysisUsage& AU) const override {
        AU.setPreservesCFG();
    }
};
}

```

## 3. 初始化Pass和其ID:

```

char MYADCE::ID = 0;
INITIALIZE_PASS(MYADCE, "myadce", "My Aggressive Dead Code
Elimination", false, false)

```

## 4. 在runOnFunction函数中实现实际的Pass:

```

bool MYADCE::runOnFunction(Function& F) {
    if (skipOptNoneFunction(F))
        return false;

    SmallPtrSet<Instruction*, 128> Alive;
    SmallVector<Instruction*, 128> Worklist;

```

```

// 收集已知的根指令
for (Instruction &I : inst_range(F)) {
    if (isa<TerminatorInst>(I) || isa<DbgInfoIntrinsic>(I)
    || isa<LandingPadInst>(I) || I.mayHaveSideEffects()) {
        Alive.insert(&I);
        Worklist.push_back(&I);
    }
}
// 向后传播生存性 (liveness)
while (!Worklist.empty()) {
    Instruction *Curr = Worklist.pop_back_val();
    for (Use &OI : Curr->operands()) {
        if (Instruction *Inst = dyn_cast<Instruction>(OI))
            if (Alive.insert(Inst).second)
                Worklist.push_back(Inst);
    }
}

// 在这个Pass中，不在生存集合中的指令被认为是无用的。不影响控制流、返回值，以及没
//有任何副作用的指令直接删除
for (Instruction &I : inst_range(F)) {
    if (!Alive.count(&I)) {
        Worklist.push_back(&I);
        I.dropAllReferences();
    }
}

for (Instruction *&I : Worklist) {
    I->eraseFromParent();
}

return !Worklist.empty();
}
}
FunctionPass *llvm::createMYAggressiveDCEPass() {
    return new MYADCE();
}

```

5. 在编译本节的“准备工作”部分提供的testcode.ll文件之后，运行之前的Pass：

```

$ opt -myadce -S testcode.ll
; ModuleID = 'testcode.ll'

```

```
; Function Attrs: nounwind readonly
declare i32 @strlen(i8*) #0

define void @test() {
    ret void
}
```

## 工作原理

在runOnFunction函数的第一个for循环中，这个Pass首先会收集所有生存的根指令列表。

在while (!Worklist.empty())循环中，我们基于根指令的活动信息，可以向后传播活动信息。

在接下来的for循环中，我们把未活动的指令（即无用的指令）删除。同时，我们检查这些变量是否被引用。如果存在对这些变量的引用，那么它们也是无用的，也全部删除。

在对测试代码运行Pass之后可以看到，无用的strlen函数调用已经被删除了。

由于实现代码已经加入了LLVM代码库，版本号为234045，所以当你的代码实现的时候，需要更新一些定义。在这个实例中，相应地修改一些代码。

## 另请参阅

关于其他多种无用代码消除方法，请参见llvm/lib/Transforms/Scalar目录，这里有其他类型的无用代码消除的实现。

# 编写内联转换Pass

内联（inline）指的是在函数调用处用函数体直接进行替换，它被证明能够有效提高程序的执行速度，而是否内联函数则由编译器决定。本节介绍如何编写一个简单的函数内联Pass以实现LLVM中的内联。我们编写的Pass将处理那些用alwaysinline属性标记的函数。

## 准备工作

首先编写运行Pass的测试代码。对lib/Transforms/IPO/IPO.cpp、include/llvm/InitializePasses.h、include/llvm/Transforms/IPO.h、include/llvm-c/Transforms/IPO.h做必要的修改来包含接下来的Pass，并且对makefile做必要的修改来包含它的Pass：

```
$ cat testcode.c
define i32 @inner1() alwaysinline {
    ret i32 1
}
define i32 @outer1() {
    %r = call i32 @inner1()
    ret i32 %r
}
```

## 详细步骤

编写Pass代码。

1. 引入必要的头文件：

```
#include "llvm/Transforms/IPO.h"
#include "llvm/ADT/SmallPtrSet.h"
#include "llvm/Analysis/AliasAnalysis.h"
```

```

#include "llvm/Analysis/AssumptionCache.h"
#include "llvm/Analysis/CallGraph.h"
#include "llvm/Analysis/InlineCost.h"
#include "llvm/IR/CallSite.h"
#include "llvm/IR/CallingConv.h"
#include "llvm/IR/DataLayout.h"
#include "llvm/IR/Instructions.h"
#include "llvm/IR/IntrinsicInst.h"
#include "llvm/IR/Module.h"
#include "llvm/IR/Type.h"
#include "llvm/Transforms/IPO/InlinerPass.h"

```

## 2. 描述Pass的类:

```

namespace {

class MyInliner : public Inliner {
    InlineCostAnalysis *ICA;

public:
    MyInliner() : Inliner(ID, -2000000000,
/*InsertLifetime*/ true),
                  ICA(nullptr) {
        initializeMyInlinerPass(*PassRegistry::getPassRegistry());
    }
    MyInliner(bool InsertLifetime)
        : Inliner(ID, -2000000000, InsertLifetime), ICA(nullptr) {
        initializeMyInlinerPass(*PassRegistry::getPassRegistry());
    }

    static char ID;

    InlineCost getInlineCost(CallSite CS) override;

    void getAnalysisUsage(AnalysisUsage &AU) const override;
    bool runOnSCC(CallGraphSCC &SCC) override;

    using llvm::Pass::doFinalization;
    bool doFinalization(CallGraph &CG) override {
        return removeDeadFunctions(CG, /*AlwaysInlineOnly=*/
true);
    }
};

}

```

## 3. 初始化Pass，增加依赖:

```

char MyInliner::ID = 0;
INITIALIZE_PASS_BEGIN(MyInliner, "my-inline",
                      "Inliner for always_inline functions", false,
                      false)
INITIALIZE_AG_DEPENDENCY(AliasAnalysis)
INITIALIZE_PASS_DEPENDENCY(AssumptionTracker)
INITIALIZE_PASS_DEPENDENCY(CallGraphWrapperPass)
INITIALIZE_PASS_DEPENDENCY(InlineCostAnalysis)
INITIALIZE_PASS_END(MyInliner, "my-inline",
                     "Inliner for always_inline functions", false,
                     false)

Pass *llvm::createMyInlinerPass() { return new
MyInliner(); }

Pass *llvm::createMyInlinerPass(bool InsertLifetime) {
    return new MyInliner(InsertLifetime);
}

```

#### 4. 实现获得内联开销的函数:

```

InlineCost MyInliner::getInlineCost(CallSite CS) {
    Function *Callee = CS.getCalledFunction();
    if (Callee && !Callee->isDeclaration() &&
        CS.hasFnAttr(Attribute::AlwaysInline) &&
        ICA->isInlineViable(*Callee))
        return InlineCost::getAlways();

    return InlineCost::getNever();
}

```

#### 5. 编写其他辅助方法:

```

bool MyInliner::runOnSCC(CallGraphSCC &SCC) {
    ICA = 0020 & getAnalysis<InlineCostAnalysis>();
    return Inliner::runOnSCC(SCC);
}

void MyInliner::getAnalysisUsage(AnalysisUsage &AU) const {
    AU.addRequired<InlineCostAnalysis>();
    Inliner::getAnalysisUsage(AU);
}

```

6. 编译Pass，然后在之前的测试代码上运行：

```
$ opt -inline-threshold=0 -always-inline -S test.ll  
;  
; ModuleID = 'test.ll'  
  
; Function Attrs: alwaysinline  
define i32 @inner1() #0 {  
    ret i32 1  
}  
define i32 @outer1() {  
    ret i32 1  
}
```

## 工作原理

我们已编写的Pass会作用于那些标记了alwaysinline属性的函数，这样的函数总是会被Pass内联。

这里起作用的主要函数是InlineCost getInlineCost(CallSite CS)，它是inliner.cpp文件中的函数，需要在这里被覆写。因此，在计算得到内联开销的基础上，我们决定是否内联一个函数。而内联处理工作的真正实现，则位于inliner.cpp文件。

在这个实例中，对于标记了alwaysinline属性的函数我们返回InlineCost::get\_Always(); 对于其他的，则返回InlineCost::getNever()。用这种方式，我们能够为简单实例实现内联。如果你想更进一步了解其他的内联变种及关于内联决策的更多知识，你可以查看inlining.cpp文件。

当对测试代码运行Pass的时候，我们可以看到对inner1函数的调用被它真实的函数体替换了。

# 编写内存优化Pass

本节简要介绍处理内存优化的转换Pass。

## 准备工作

你需要安装opt工具。

## 详细步骤

1. 首先为memcpy优化Pass编写测试代码:

```
$ cat memcopytest.ll
@cst = internal constant [3 x i32] [i32 -1, i32 -1, i32 -1],
align 4

declare void @llvm.memcpy.p0i8.p0i8.i64(i8* nocapture, i8*
nocapture, i64, i32, i1) nounwind
declare void @foo(i32*) nounwind

define void @test1() nounwind {
    %arr = alloca [3 x i32], align 4
    %arr_i8 = bitcast [3 x i32]* %arr to i8*
    call void @llvm.memcpy.p0i8.p0i8.i64(i8* %arr_i8, i8* bitcast
([3 x i32]* @cst to i8*), i64 12, i32 4, i1 false)
    %arraydecay = getelementptr inbounds [3 x i32], [3 x i32]*
%arr, i64 0, i64 0
    call void @foo(i32* %arraydecay) nounwind
    ret void
}
```

2. 在之前的测试实例上运行memcpyoptPass:

```
$ opt -memcpyopt -S memcopytest.ll
```

```

; ModuleID = ' memcopytest.ll'

@cst = internal constant [3 x i32] [i32 -1, i32 -1, i32 -1],
align 4

; Function Attrs: nounwind
declare void @llvm.memcpy.p0i8.p0i8.i64(i8* nocapture, i8*
nocapture readonly, i64, i32, i1) #0

; Function Attrs: nounwind
declare void @foo(i32*) #0

; Function Attrs: nounwind
define void @test1() #0 {
    %arr = alloca [3 x i32], align 4
    %arr_i8 = bitcast [3 x i32]* %arr to i8*
    call void @llvm.memset.p0i8.i64(i8* %arr_i8, i8 -1, i64 12,
i32 4, i1 false)
    %arraydecay = getelementptr inbounds [3 x i32]* %arr, i64 0,
i64 0
    call void @foo(i32* %arraydecay) #0
    ret void
}

; Function Attrs: nounwind
declare void @llvm.memset.p0i8.i64(i8* nocapture, i8, i64,
i32, i1) #0

attributes #0 = { nounwind }

```

## 工作原理

MemcpyoptPass会尽可能消除memcpy调用，或者把它们转为其他调用。

考虑如下memcpy调用：

```
call void @llvm.memcpy.p0i8.p0i8.i64(i8* %arr_i8, i8* bitcast ([3
i32]* @cst to i8*), i64 12, i32 4, i1 false) .
```

在前面的测试实例中，这个Pass会将上面的调用转为memset调用：

```
call void @llvm.memset.p0i8.i64(i8* %arr_i8, i8 -1, i64 12, i32 4  
false)
```

如果我们去看这个Pass的源码，会发现这个转换是  
 llvm/lib/Transforms/ Scalar/MemCpyOptimizer.cpp文件的  
tryMergingIntoMemset函数带来的。

tryMergingIntoMemset函数在扫描内存转移指令的时候会查找一些其他的模式以进行折叠。它会在邻近的内存中寻找仓库，看是否有连续的1，如果有的话会把它们一起合并到memset中。

processMemSet函数会查找与当前memset邻近的memset，这有助于我们拓宽memset调用以创建一个更大的仓库。

## 另请参阅

关于各种内存优化Pass类型的详细信息，请参见  
<http://llvm.org/docs/Passes.html#memcpyopt-memcpy-optimization>。

# 合并LLVM IR

本节介绍在LLVM中如何合并指令。指令合并指的是把一系列指令替换为一些更加高效的指令，而得到相同的结果，以此来减少CPU周期。本节展示修改LLVM代码来合并特定的指令。

## 准备工作

为了测试我们的实现，我们编写测试代码，以确认我们的实现是否正确地合并了指令：

```
define i32 @test19(i32 %x, i32 %y, i32 %z) {
    %xor1 = xor i32 %y, %z
    %or = or i32 %x, %xor1
    %xor2 = xor i32 %x, %z
    %xor3 = xor i32 %xor2, %y
    %res = xor i32 %or, %xor3
    ret i32 %res
}
```

## 详细步骤

1. 打开lib/Transforms/InstCombine/InstCombineAndOrXor.cpp文件。
2. 在InstCombiner::visitXor(BinaryOperator &I)函数中，修改if分支并添加以下代码：——if (Op0I && Op1I)

```
if (match(Op0I, m_Or(m_Xor(m_Value(B), m_Value(C)), m_Value(A)))
&&
     match(Op1I, m_Xor( m_Xor(m_Specific(A),
m_Specific(C)), m_Specific(B)))) {
    return BinaryOperator::CreateAnd(A, Builder-
>CreateXor(B,C)); }
```

3. 重新构建LLVM，使得opt工具能够使用这个新的功能，并用如下 的方式运行测试实例：

```
Opt -instcombine -S testcode.ll
define i32 @test19(i32 %x, i32 %y, i32 %z) {
%1 = xor i32 %y, %z
%res = and i32 %1, %x
ret i32 %res
}
```

## 工作原理

本节我们给指令合并的文件添加了一些代码，来处理包含与、或、 异或运算符的转换。

为匹配 $(A|(B \wedge C)) \wedge ((A \wedge C) \wedge B)$ 形式的模式增加代码，然后把它归 约成 $A \& (B \wedge C)$ 。

```
if(match(Op0I,m_Or(m_Xor(m_Value(B),m_Value(C)),m_Value(A)))&&
match(Op1I,m_Xor(m_Xor(m_Specific(A),m_Specific(C)),m_Specific(B))))语句查找与本段开头提到的那个模式相似的模式。
```

return BinaryOperator::CreateAnd(A, Builder->CreateXor(B,C));返回 构建新的指令后的归约值，即替换原来的匹配代码。

在对测试代码运行instcombine Pass之后，可以得到归约后的结果。 你可以看到原本的5个操作变成了2个。

## 另请参阅

- 合并指令这个话题非常宽泛，有大量的可能性。与指令合并函数类 似的是指令简化函数，它把复杂的指令简化成简单的指令，但不像 指令合并那样减少指令数量。关于更多的细节，请参见

lib/Transforms/InstCombine 目录。

# 循环的转换与优化

本节将介绍对循环进行转换和优化以得到更短的执行时间。我们主要展示循环常量提升（**Loop-Invariant Code Motion**——LICM）技术，它如何运行及如何改变代码。同时也会展示一种相对简单的技术——循环删除，消除对返回值没有副作用的普通循环（循环次数对循环返回值无影响、非死循环）。

## 准备工作

你需要安装opt工具。

## 详细步骤

1. 编写LICM Pass的测试实例：

```
$ cat testlicm.ll
define void @testfunc(i32 %i) {
;<label>:0
    br label %Loop
Loop:   ; preds = %Loop, %0
    %j = phi i32 [ 0, %0 ], [ %Next, %Loop ]  : <i32>
[#uses=1]
    %i2 = mul i32 %i, 17  ;<i32> [#uses=1]
    %Next = add i32 %j, %i2  ;<i32> [#uses=2]
    %cond = icmp eq i32 %Next, 0  ;<i1> [#uses=1]
    br i1 %cond, label %Out, label %Loop
Out:   ;preds = %Loop
    ret void
}
```

2. 在测试代码上执行LICM Pass：

```

$ opt licmtest.ll -licm -S
; ModuleID = 'licmtest.ll'

define void @testfunc(i32 %i) {
    %i2 = mul i32 %i, 17
    br label %Loop

Loop:          ; preds =
%Loop, %0
    %j = phi i32 [ 0, %0 ], [ %Next, %Loop ]
    %Next = add i32 %j, %i2
    %cond = icmp eq i32 %Next, 0
    br i1 %cond, label %Out, label %Loop

Out:          ; preds =
%Loop
    ret void
}

```

3. 编写循环删除Pass的测试代码:

```

$ cat deletetest.ll
define void @foo(i64 %n, i64 %m) nounwind {
entry:
    br label %bb

bb:
    %x.0 = phi i64 [ 0, %entry ], [ %t0, %bb2 ]
    %t0 = add i64 %x.0, 1
    %t1 = icmp slt i64 %x.0, %n
    br i1 %t1, label %bb2, label %return
bb2:
    %t2 = icmp slt i64 %x.0, %m
    br i1 %t2, label %bb, label %return
return:
    ret void
}

```

4. 最后，在测试代码上执行循环删除Pass:

```

$ opt deletetest.ll -loop-deletion -S
; ModuleID = "deletetest.ll"

; Function Attrs: nounwind

```

```
define void @foo(i64 %n, i64 %m) #0 {
entry:
  br label %return

return:          ; preds =
%entry
  ret void
}

attributes #0 = { nounwind }
```

## 工作原理

LICM Pass对循环常量代码进行提升：它会把循环中不变的代码提升到循环体外，或者是循环之前的pre-header块，或者是循环之后的exit块。

在之前的样例中，`%i2 = mul i32 %i, 17`这部分代码被移到循环之前，因为这条指令没有在循环块中改变。

而循环删除Pass会查找对函数返回值没有作用，并且迭代有限次数的非死循环。

在测试代码中，我们可以看到两个基本块bb:和bb2:包含了无意义的循环。因为其中的循环被删除了，所以foo函数直接跳到返回语句了。

对于循环优化其实有很多其他的技术，例如loop-rotate、loop-unswitch、Loop-unroll等。你可以自己尝试，来看看它们如何改变代码。

# 表达式重组

本节介绍表达式重组，以及如何在优化中奏效。

## 准备工作

本节你需要安装opt工具。

## 详细步骤

1. 首先为简单的表达式重组编写测试实例：

```
$ cat testreassociate.ll
define i32 @test(i32 %b, i32 %a) {
    %tmp.1 = add i32 %a, 1234
    %tmp.2 = add i32 %b, %tmp.1
    %tmp.4 = xor i32 %a, -1
    ; (b+(a+1234))+~a -> b+1233
    %tmp.5 = add i32 %tmp.2, %tmp.4
    ret i32 %tmp.5
}
```

2. 在测试实例之上运行重组Pass，查看已修改的代码：

```
$ opt testreassociate.ll -reassociate -die -S
define i32 @test(i32 %b, i32 %a) {
    %tmp.5 = add i32 %b, 1233
    ret i32 %tmp.5
}
```

## 工作原理

重组指的是利用代数的结合律、交换律、分配律来对表达式重新安排以实现其他的优化，例如常量折叠、LICM等。

在之前的样例中，我们使用了逆属性通过重组来消除像" $X + \sim X \rightarrow -1$ "这样的模式。

测试实例前面3行给出了表达式 $(b+(a+1234)+\sim a)$ 。在这个表达式中，运行重组Pass之后可以把 $a + \sim a$ 变为-1，因此得到最终的返回值是 $b + 1234 - 1 = b + 1233$ 。

处理转换的代码是在lib/Transforms/Scalar/Reassociate.cpp文件中。

如果你查看这个文件相应的代码片段，你会发现代码会查看操作数是否存在 $a$ 和 $\sim a$ :

```
if (!BinaryOperator::isNeg(TheOp) && !BinaryOperator::isNot(TheOp)
    continue;

Value *X = nullptr;
...
...
else if (BinaryOperator::isNot(TheOp))
    X = BinaryOperator::getNotArgument(TheOp);
unsigned FoundX = FindInOperandList(Ops, i, X);
```

如果在表达式中有这样的值，下面的代码负责处理并插入-1:

```
if (BinaryOperator::isNot(TheOp)) {
    Value *V = Constant::getAllOnesValue(X->getType());
    Ops.insert(Ops.end(), ValueEntry(getRank(V), V));
    e += 1;
}
```

# IR向量化

向量化（**Vectorization**）是编译器的一个重要优化，它可以向量化代码，在多个数据集上同时执行一条指令。如果后端架构支持向量寄存器，那么一个很宽范围的数据就能存储于这些向量寄存器中，而特殊的向量指令可以操作这些寄存器。

在LLVM中有两种类型的向量化，一种是超字级并行（**Superword Level Parallelism**——**SLP**），另一种是循环向量化（**loop vectorization**）。循环向量化针对循环，而SLP则把基本块中的线性代码向量化。本节介绍线性代码如何被向量化。

## 准备工作

SLP向量化会构建一个自底向上的IR表达式树，然后大概比较树的节点来判断是否存在相似节点可以组合成向量。将要进行修改的文件是lib/Transforms/Vectorize/ SLPVectorizer.cpp。

我们会尝试对一段线性代码进行向量化，例如return a[0] + a[1] + a[2] + a[3]。

前面类型代码的表达式树是非平衡树，我们可以运行一次DFS（深度优先搜索）来存储操作数和操作符。

前面那种类型的表达式的IR如下：

```
define i32 @hadd(i32* %a) {
entry:
    %0 = load i32* %a, align 4
    %arrayidx1 = getelementptr inbounds i32* %a, i32 1
    %1 = load i32* %arrayidx1, align 4
    %add = add nsw i32 %0, %1
    %arrayidx2 = getelementptr inbounds i32* %a, i32 2
    %2 = load i32* %arrayidx2, align 4
    %add3 = add nsw i32 %add, %2
```

```

%arrayidx4 = getelementptr inbounds i32* %a, i32 3
%3 = load i32* %arrayidx4, align 4
%add5 = add nsw i32 %add3, %3
ret i32 %add5
}

```

向量化模型执行以下3步。

1. 检查向量化的合法性。
2. 计算向量化代码相比于标量代码执行的收益。
3. 如果前两个条件都满足，那么进行代码的向量化。

## 详细步骤

1. 打开SLPVectorizer.cpp文件，对于“准备工作”一节展示的IR，我们需要实现一个新的函数来对表达式树做DFS遍历：

```

bool matchFlatReduction(PHINode *Phi, BinaryOperator *B,
const DataLayout *DL) {

    if (!B)
        return false;

    if (B->getType()->isVectorTy() ||
        !B->getType()->isIntegerTy())
        return false;

    ReductionOpcode = B->getOpcode();
    ReducedValueOpcode = 0;
    ReduxWidth = MinVecRegSize / DL->getTypeAllocSizeInBits(B-
        >getType());
    ReductionRoot = B;
    ReductionPHI = Phi;

    if (ReduxWidth < 4)
        return false;
    if (ReductionOpcode != Instruction::Add)
        return false;
}

```

```

SmallVector<BinaryOperator *, 32> Stack;
ReductionOps.push_back(B);
ReductionOpcode = B->getOpcode();
Stack.push_back(B);

// 遍历树
while (!Stack.empty()) {
    BinaryOperator *Bin = Stack.back();
    if (Bin->getParent() != B->getParent())
        return false;
    Value *Op0 = Bin->getOperand(0);

    Value *Op1 = Bin->getOperand(1);
    if (!Op0->hasOneUse() || !Op1->hasOneUse())
        return false;
    BinaryOperator *Op0Bin = dyn_cast<BinaryOperator>(Op0);
    BinaryOperator *Op1Bin = dyn_cast<BinaryOperator>(Op1);
    Stack.pop_back();

    // 如果左右操作数都是二元操作符则不处理
    if (Op0Bin && Op1Bin)
        return false;
    // 左右操作数都不是二元操作符
    if (!Op0Bin && !Op1Bin) {
        ReducedVals.push_back(Op1);
        ReducedVals.push_back(Op0);

        ReductionOps.push_back(Bin);
        continue;
    }

    // 一个操作数是二元操作符，为进一步的处理把它放到栈里。

    // 把其他非二元操作符推入ReducedVals
    if (Op0Bin) {
        if (Op0Bin->getOpcode() != ReductionOpcode)
            return false;
        Stack.push_back(Op0Bin);
        ReducedVals.push_back(Op1);

        ReductionOps.push_back(Op0Bin);
    }

    if (Op1Bin) {
        if (Op1Bin->getOpcode() != ReductionOpcode)
            return false;
        Stack.push_back(Op1Bin);
    }
}

```

```

        ReducedVals.push_back(Op0);
        ReductionOps.push_back(Op1Bin);
    }
}
SmallVector<Value *, 16> Temp;
// 把a[3], a[2], a[1], a[0]反转成a[0], a[1], a[2], a[3]
while (!ReducedVals.empty())
    Temp.push_back(ReducedVals.pop_back_val());
ReducedVals.clear();
for (unsigned i = 0, e = Temp.size(); i < e; ++i)
    ReducedVals.push_back(Temp[i]);
return true;
}

```

2. 计算向量化IR的开销，判断向量化是否会获益。在SLPVectorizer.cpp文件中，为getReductionCost函数增加以下代码：

```

int HAddCost = INT_MAX;
// 如果识别到水平添加模式，就计算向量化开销

// 水平添加模式条件可以被建模为对子向量的洗牌（shuffle）、增加向量、提取向量
// 元素

// 例如，a[0]+a[1]+a[2]+a[3]可以建模为
// %1 = load <4 x> %0
// %2 = shuffle %1 <2, 3, undef, undef>
// %3 = add <4 x> %1, %2

// %4 = shuffle %3 <1, undef, undef, undef>

// %5 = add <4 x> %3, %4

// %6 = extractelement %5 <0>
if (IsHAdd) {
    unsigned VecElem = VecTy->getVectorNumElements();
    unsigned NumRdxLevel = Log2_32(VecElem);
    HAddCost = NumRdxLevel *
        (TTI->getArithmeticInstrCost(ReductionOpcode, VecTy) +
         TTI->getShuffleCost(TargetTransformInfo::
             SK_ExtractSubvector, VecTy, VecElem / 2, VecTy)) +
        TTI->getVectorInstrCost(Instruction::ExtractElement,
                                VecTy, 0);
}

```

3. 在同一个函数中，计算PairwiseRdxCost和SplittingRdxCost之后，

与HAddCost比较：

```
VecReduxCost = HAddCost < VecReduxCost ? HAddCost :  
VecReduxCost;
```

4. 在vectorizeChainsInBlock()函数中调用之前定义的matchFlatReduction()函数：

```
// 尝试有回报的向量化水平归约  
if (ReturnInst *RI = dyn_cast<ReturnInst>(it))  
  
if (RI->getNumOperands() != 0)  
if (BinaryOperator *BinOp =  
    dyn_cast<BinaryOperator>(RI->getOperand(0))) {  
  
DEBUG(dbgs()<< "SLP: Found a return to vectorize.\n");  
  
HorizontalReduction HorRdx;  
IsReturn = true;  
  
if ((HorRdx.matchFlatReduction(nullptr, BinOp, DL) &&  
HorRdx.tryToReduce(R, TTI)) || tryToVectorizePair(BinOp->  
getOperand(0), BinOp->getOperand(1), R)) {  
    Changed = true;  
  
    it = BB->begin();  
    e = BB->end();  
    continue;  
}  
}
```

5. 定义两个全局标记来记录有回报的水平归约（horizontal reduction）：

```
static bool IsReturn = false;  
static bool IsHAdd = false;Vector
```

6. 如果有回报，那么就允许向量化小的树结构，为isFullyVectorizableTinyTree()函数增加代码：

```
if (VectorizableTree.size() == 1 && IsReturn && IsHAdd)
return true;
```

## 工作原理

在保存了包含以上代码的文件之后，重新编译LLVM项目，在样例IR上运行opt工具，如下所述。

1. 打开example.ll文件，把如下的IR粘贴进去：

```
define i32 @hadd(i32* %a) {
entry:
%0 = load i32* %a, align 4
%arrayidx1 = getelementptr inbounds i32* %a, i32 1
%1 = load i32* %arrayidx1, align 4
%add = add nsw i32 %0, %1
%arrayidx2 = getelementptr inbounds i32* %a, i32 2
%2 = load i32* %arrayidx2, align 4
%add3 = add nsw i32 %add, %2
%arrayidx4 = getelementptr inbounds i32* %a, i32 3
%3 = load i32* %arrayidx4, align 4
%add5 = add nsw i32 %add3, %3
ret i32 %add5
}
```

2. 在example.ll文件上运行opt工具：

```
$ opt -basicaa -slp-vectorizer -mtriple=aarch64-unknown-linux-gnu
-mcpu=cortex-a57
```

输出如下的向量化的代码：

```
define i32 @hadd(i32* %a) {
entry:
%0 = bitcast i32* %a to<4 x i32>*
%1 = load<4 x i32>* %0, align 4 %rdx.shuf = shufflevector<4
x i32> %1,<4 x i32> undef,<4 x i32><i32 2, i32 3, i32
undef, i32 undef>
```

```
%bin.rdx = add<4 x i32> %1,  
  
%rdx.shuf %rdx.shuf1 = shufflevector<4 x i32>  
  
%bin.rdx,<4 x i32> undef,<4 x i32><i32 1, i32 undef, i32  
undef, i32 undef> %bin.rdx2 = add<4 x i32> %bin.rdx,  
%rdx.shuf1  
  
%2 = extractelement<4 x i32> %bin.rdx2, i32 0  
  
ret i32 %2  
  
}
```

可以看到，代码被向量化了。matchFlatReduction()函数在表达式上执行了DFS遍历，把所有的负载都存储于ReducedVals，所有的add操作都存储于ReductionOps。在此之后，在HAddCost计算水平向量化的开销，并与标量计算比较，以判断是否获益。如果获益，就执行向量化表达式，即执行已经实现的tryToReduce()函数。

## 另请参阅

- 关于向量化的更多详细概念，请参考论文*Loop-Aware SLP in GCC*，由 Ira Rosen、Dorit Nuzman和Ayal Zaks所著。

# 其他优化Pass

本节介绍更多的一些变换Pass，它们更像是共用的Pass。我们会分析strip-debug-symbols和prune-eh Pass。

## 准备工作

你需要安装opt工具。

## 详细步骤

1. 首先，编写strip-debug Pass的测试实例，它会把调试符号从测试代码中删除：

```
$ cat teststripdebug.ll
@x = common global i32 0          ; <i32*>
[#uses=0]

define void @foo() nounwind readnone optsize ssp {
entry:
  tail call void @llvm.dbg.value(metadata i32 0, i64 0,
metadata !5, metadata !{}), !dbg !10
    ret void, !dbg !11
}

declare void @llvm.dbg.value(metadata, i64, metadata,
metadata) nounwind readnone

!llvm.debug.cu = !{!2}
!llvm.module.flags = !{!13}
!llvm.debug.sp = !{!0}
!llvm.debug.lv.foo = !{!5}
!llvm.debug.gv = !{!8}

!0 = !MDSubprogram(name: "foo", linkageName: "foo", line: 2,
```

```

isLocal: false, isDefinition: true, virtualIndex: 6,
isOptimized: true, file: !12, scope: !1, type: !3, function:
void ()* @foo)
!1 = !MDFile(filename: "b.c", directory: "/tmp")
!2 = !MDCompileUnit(language: DW_LANG_C89, producer: "4.2.1
(Based on Apple Inc. build 5658) (LLVM build)", isOptimized:
true, emissionKind: 0, file: !12, enums: !4, retainedTypes:
!4)
!3 = !MDSubroutineType(types: !4)
!4 = !{null}
!5 = !MDLocalVariable(tag: DW_TAG_auto_variable, name: "y",
line: 3, scope: !6, file: !1, type: !7)
!6 = distinct !MDLexicalBlock(line: 2, column: 0, file: !12,
scope: !0)
!7 = !MDBasicType(tag: DW_TAG_base_type, name: "int", size:
32, align: 32, encoding: DW_ATE_signed)
!8 = !MDGlobalVariable(name: "x", line: 1, isLocal: false,
isDefinition: true, scope: !1, file: !1, type: !7, variable:
i32* @x)
!9 = !{i32 0}
!10 = !MDLocation(line: 3, scope: !6)
!11 = !MDLocation(line: 4, scope: !6)
!12 = !MDFile(filename: "b.c", directory: "/tmp")
!13 = !{i32 1, !"Debug Info Version", i32 3}

```

2. 将-strip-debug命令行选项传入opt工具，运行strip-debug-symbolsPass:

```

$ opt -strip-debug teststripdebug.ll-S
; ModuleID = ' teststripdebug.ll'

@x = common global i32 0

; Function Attrs: nounwind optsize readonly ssp
define void @foo() #0 {
entry:
    ret void
}

attributes #0 = { nounwind optsize readonly ssp }

!llvm.module.flags = !{!0}

!0 = metadata !{i32 1, metadata !"Debug Info Version", i32 2}

```

### 3. 编写检查prune-ehPass的测试实例:

```
$ cat simpletest.ll
declare void @nounwind() nounwind

define internal void @foo() {
    call void @nounwind()
    ret void
}

define i32 @caller() {
    invoke void @foo()
        to label %Normal unwind label %Except

Normal: ; preds = %0
    ret i32 0

Except: ; preds = %0
    landingpad { i8*, i32 } personality i32 (...)*
@__cxx_personality_v0
        catch i8* null
    ret i32 1
}
declare i32 @__cxx_personality_v0(...)
```

### 4. 通过将-prune-eh命令行选项传入opt工具运行Pass，删除未使用的异常处理信息:

```
$ opt -prune-eh -S simpletest.ll
; ModuleID = 'simpletest.ll'

; Function Attrs: nounwind
declare void @nounwind() #0

; Function Attrs: nounwind
define internal void @foo() #0 {
    call void @nounwind()
    ret void
}

; Function Attrs: nounwind
define i32 @caller() #0 {
    call void @foo()
    br label %Normal
```

```
Normal:          ; preds = %0
    ret i32 0
}

declare i32 @_gxx_personality_v0(...)

attributes #0 = { nounwind }
```

## 工作原理

在第一个实例中，我们运行了strip-debug Pass，它会把代码中的调试信息删除，得到更加紧凑的代码。这个Pass仅仅用于得到更加紧凑的代码，因为它能删除虚拟寄存器的名字，以及内部全局变量和函数的符号，使得源码可读性降低并且增加了逆向工程代码的难度。

处理这个转换的代码部分位于  
llvm/lib/Transforms/IPO/StripSymbols.cpp文件，其中  
StripDeadDebugInfo::runOnModule函数负责删除调试信息。

第二个测试是使用prune-eh Pass，删除未使用的异常处理信息，它实现一个过程间Pass (interprocedural)。它遍历函数调用图，如果被调函数不抛出异常，就把invoke指令转为call指令；如果函数本身不抛出异常，就把函数标记上nounwind。

## 另请参阅

- 关于其他转换Pass的信息，请参见  
<http://llvm.org/docs/Passes.html#transform-passes>。

# 第6章 平台无关代码生成器

本章涵盖以下话题。

- LLVM IR指令的生命周期
- 使用GraphViz可视化LLVM IR控制流图
- 使用TableGen描述目标平台
- 定义指令集
- 添加机器码描述
- 实现MachineInstrBuilder类
- 实现MachineBasicBlock类
- 实现MachineFunction类
- 编写指令选择器
- 合法化SelectionDAG
- 优化SelectionDAG
- 基于DAG的指令选择
- 基于SelectionDAG的指令调度

# 概述

在优化LLVM IR之后，它需要被转为机器指令才能执行，而平台无关的代码生成器接口则为从IR到机器指令的转换提供了一个抽象层。在这个阶段，IR被转换为SelectionDAG（**DAG**指的是有向无环图），之后多个阶段会作用于SelectionDAG的节点。本章描述了平台无关的代码生成过程中的几个重要阶段。

# LLVM IR指令的生命周期

前面的章节中我们看到了高级语言指令、声明、逻辑块、函数调用、循环等如何被转为LLVM IR，然后在IR上会实施各种优化Pass使它达到最佳的状态。生成的LLVM IR是SSA形式的，它是抽象的并且与高级或低级语言的约束无关，因此才能运行各种优化Pass。除了这些平台无关的优化之外，还有一些优化是平台相关的，会在IR转为机器指令之后再运行。

在得到优化过的LLVM IR之后，下一个阶段就是把它转为目标平台的指令了。LLVM通过SelectionDAG来将IR转为机器指令。在此过程中，指令通过DAG的节点来表示，最后线性的IR便被转为了SelectionDAG。在此之后，SelectionDAG还要经历以下几个阶段。

- 由LLVM IR创建SelectionDAG。
- SelectionDAG节点合法化。
- DAG合并优化。
- 针对目标指令的指令选择。
- 调度并发射机器指令。
- 寄存器分配——SSA解构、寄存器赋值、寄存器溢出。
- 发射机器码。

所有以上步骤在LLVM中都是模块化的。

## C代码到LLVM IR

第一步是把前端语言的样例转为LLVM IR。样例如下：

```
int test (int a, int b, int c) {  
    return c/(a+b);  
}
```

以上的C语言代码得到的LLVM IR是：

```
define i32 @test(i32 %a, i32 %b, i32 %c) {
    %add = add nsw i32 %a, %b
    %div = sdiv i32 %add, %c
    return i32 %div
}
```

## IR优化

如同之前章节所描述的，之后IR便要经历多种优化Pass。IR在转换阶段，要经历InstCombine Pass的InstCombiner::visitSDiv()函数。此函数会调用SimplifyS DivInst()函数，它会检查是否还存在进一步简化指令的机会。

## LLVM IR转为SelectionDAG

在IR转换和优化之后，LLVM IR指令会转换为**SelectionDAG**节点。Selection DAG节点由SelectionDAGBuilder类创建，SelectionDAGISel类调用SelectionDAGBuilder::visit()函数，遍历每个IR指令来创建SDAGNode节点。SelectionDAGBuilder::visitSDiv方法用于处理SDiv指令，它会依据ISD::SDIV操作码来向DAG请求一个新的SDNode节点，再创建DAG中的节点。

## 合法化SelectionDAG

目前创建的SelectionDAG节点未必会被目标架构全部支持，因此还需要对DAG节点做出一点修改以适应目标平台，这一过程叫作合法化（legalization）。在Selection DAG的初始阶段，这些不被支持的节点被认为是不合法的。在SelectionDAG机制真正为DAG节点进行机器指令发射之前，这些不合法的节点都会做一些转换以支持目标平台。因此，合法化是代码发射之前最重要的阶段之一。

SDNode合法化包括数据类型和操作两个方面。目标平台的相关信息通过一个叫作TargetLowering的接口传递给平台无关的算法，这个接口由目标平台实现，描述了 LLVM IR 如何 lowering 到合法的 SelectionDAG 操作。例如，x86 平台的 lowering 由 X86TargetLowering 接口实现。在 lowering 的过程中，由 setOperationAction() 函数来指定 ISD 节点是否需要被操作合法化扩展或改变。在此之后，SelectionDAGLegalize::LegalizeOp 如果发现扩展标记，就在 setOperationAction() 调用中用特定参数替换 SDNode 节点。

## 从目标平台无关DAG转换为机器DAG

在完成指令合法化之后，SDNode 需要被转为 MachineSDNode，也就是转为目标平台的机器指令。机器指令由一个通用的基于表的 .td 文件描述，之后这些文件通过 tablegen 工具转为 .inc 文件，在 .inc 文件中用枚举类型描述了目标平台的寄存器、指令集等信息，并且可以直接被 C++ 代码调用。指令选择的过程可以由 SelectCode 自动选择器完成，或者通过编写自定义的 SelectionDAGISel::Select 函数自己定制。在这一步中创建的 DAG 节点是 MachineSDNode 节点，它是 SDNode 的子类，持有用来构建真实机器指令的必要信息，但仍是 DAG 节点形式。

## 指令调度

机器执行线性指令集，而现在我们得到的机器指令仍是 DAG 形式的，所以还需要把 DAG 转为线性指令集，这个过程可以通过对 DAG 进行一次拓扑排序完成。尽管很轻松地就能得到线性指令集，但它可能不是最优化的结果，例如由于指令依赖、寄存器压力、流水线阻塞等问题，都会造成执行延迟。因此还需要对线性指令集进行顺序上的优化，这个过程叫作指令调度。由于目标平台有自己的寄存器集和自定义的指令流水线，所以它们也提供了自己的调度接口和一些启发式算法来优化、加速代码。在计算了代码的最佳执行顺序之后，调度器就会发射机器基本块中的机器指令，最终解构 DAG。

# 寄存器分配

在发射机器指令之后，分配的寄存器是虚拟寄存器（virtual register）。实际中，可以分配无限数量的虚拟寄存器，而真实机器的寄存器数量却是有限的。这些有限的寄存器需要被有效分配。如果无法做到，就会造成寄存器溢出<sup>④</sup>（register spilling），导致冗余的加载或存储操作。这样也会造成CPU周期的浪费，不仅减慢了执行速度，而且增加了内存占用。

寄存器分配有多种算法。在分配寄存器时有一个重要的分析——变量活跃度和活动周期的分析。如果两个变量在一个周期内活动，即它们之前存在周期冲突，那么它们就不能分配到同一个寄存器。通过分析活跃度，可以画出冲突图（interference graph），再使用图染色算法进行寄存器分配。不过图染色算法的复杂度是二次方的，会导致较长的编译时间。

LLVM采用了贪心法来进行寄存器分配，即活动周期越长的变量先分配寄存器。生存周期短的变量则填补可用寄存器的时间间隙，减少溢出权重。溢出是由于没有足够的寄存器分配而发生的加载存储操作，溢出权重是溢出的操作开销。有时，活动周期也会溢出，让变量能够容纳于寄存器当中。

需要注意的是，在寄存器分配之前指令都是SSA形式的，而在现实世界中SSA形式并不真的存在，因为不会存在具有无限寄存器的机器。在一些架构类型中，一些指令需要固定寄存器。

# 代码发射

目前为止，原始的高级语言已经翻译为机器指令了，下一步就是代码发射。LLVM中代码发射有两种方式，一种是JIT，直接把代码发射到内存，然后执行；另一种则是使用MC框架，对所有的后端目标平台来说，都可以发射到汇编和目标文件。LLVMTargetMachine::addPassesToEmitFile函数负责定义发射代码到目标文件的行为

序列，而具体的MI到MCInst的转换是在AsmPrinter接口的EmitInstruction函数中实现的。如果想发射目标文件（或汇编代码），可以通过实现MCStreamer接口来完成。例如，静态编译工具llc就可以用来为目标平台生成汇编指令。<sup>②</sup>

# 使用**GraphViz**可视化**LLVM IR**控制流图

LLVM IR的控制流图可以通过GraphViz工具来可视化。它提供了已形成节点的可视化描述和已生成IR中代码流的走向。在LLVM中，很多重要的数据结构都是用图来表示的，因此当编写自定义Pass或学习IR模式的行为时理解IR流是非常有用的方式。

## 准备工作

1. 如果在Ubuntu安装graphviz，需要先添加ppa仓库：

```
$ sudo apt-add-repository ppa:dperry/ppa-graphviz-test
```

2. 更新程序包仓库：

```
$ sudo apt-get update
```

3. 安装graphviz：

```
$ sudo apt-get install graphviz
```

如果你得到以下报错：graphviz: Depends:libgraphviz4 (>= 2.18)，but it is going to be installed，请执行以下命令：

```
$ sudo apt-get remove libcdt4  
$ sudo apt-get remove libpathplan4
```

然后使用以下命令安装graphviz：

```
$ sudo apt-get install graphviz
```

## 详细步骤

1. 一旦IR转为DAG之后，在之后的各个阶段可以分别查看。创建包含以下代码的test.ll文件：

```
$ cat test.ll
define i32 @test(i32 %a, i32 %b, i32 %c) {
    %add = add nsw i32 %a, %b
    %div = sdiv i32 %add, %c
    ret i32 %div
}
```

2. 执行以下命令，展示在构建之后，执行第1次优化Pass之前的DAG：

```
$ llc -view-dag-combine1-dags test.ll
```

下图展示了在执行第1个优化Pass之前的DAG：



3. 执行以下命令，展示合法化之前的DAG:

```
$ llc -view-legalize-dags test.ll
```

下图这是合法化阶段之前的DAG:



4. 执行以下命令，展示在执行第2个优化Pass之前的DAG:

```
$ llc -view-dag-combine2-dags test.ll
```

下图展示在执行第2个优化Pass之前的DAG:



5. 输入以下命令，展示在执行指令选择阶段之前的DAG:

```
$ llc -view-isel-dags test.ll
```

下图展示在执行指令选择阶段之前的DAG:



6. 执行以下命令，展示在执行指令调度之前的DAG:

```
$ llc -view-sched-dags test.ll
```

下图是在执行指令调度之前的DAG:



7. 执行以下命令，展示指令调度器的依赖图：

```
$ llc -view-sunit-dags test.ll
```

下图展示指令调度器的依赖图：



注意在合法化阶段前后DAG中的区别。由于x86目标平台不支持sdiv节点，仅支持sdivrem指令，所以DAG中的sdiv节点被转换为sdivrem节点。在这种情况下，对x86目标平台来说sdiv指令是不合法的。在合法化阶段将其转换为sdivrem指令，被x86目标平台支持了。

同样，注意在指令选择（ISel）阶段前后的DAG也有区别。像Load这样的平台无关的抽象指令被转为MOV32rm机器代码（从内存移动32位数据到寄存器）。因此指令选择阶段也是相当重要的一个阶段，之后的章节会描述。

观察DAG的调度单元。每个单元被连接在一起，它们之间存在依赖。对于调度算法来说，这些依赖信息则非常重要。例如，在前面的例子中，调度单元0（SU0）依赖调度单元1（SU1），所以SU0中的指令不能在SU1的指令之前被调度。同样，SU1依赖SU2，SU2依赖SU3。

## 另请参阅

- 关于在debug模式下查看这些图的更多信息，请参见  
<http://llvm.org/docs/ProgrammersManual.html#viewing-graphs-while-debugging-code>。

# 使用TableGen描述目标平台

目标架构可以用寄存器集合、指令集等形式来描述。手动来编写这些信息是单调乏味的，为了降低后端开发者描述目标平台的难度，LLVM采用TableGen工具以及描述式的语言——\*.td文件来描述目标平台。而\*.td文件可以转为enum类型、DAG模式匹配函数、指令编码解码函数，因此编码时可以在C++文件中调用。

为了在目标描述的.td文中定义寄存器和寄存器集合，tablegen将.td文件转为.inc文件，可以在.cpp文件中用#include语法来引入，从而引用其中的寄存器。

## 准备工作

假定我们的目标平台有4个通用寄存器，r0~r3，一个栈指针寄存器sp，一个链接寄存器lr。这些信息可以在SAMPLERegisterInfo.td文件中指定，并且TableGen工具提供了Register类，通过继承可以指定其他的寄存器。

## 详细步骤

1. 在lib/Target创建SAMPLE目录：

```
$ mkdir llvm_root_directory/lib/Target/SAMPLE
```

2. 在SAMPLE目录下创建SAMPLERegisterInfo.td文件：

```
$ cd llvm_root_directory/lib/Target/SAMPLE
$ vi SAMPLERegisterInfo.td
```

### 3. 定义硬件编码、命名空间、寄存器，以及寄存器类：

```
class SAMPLEReg<bits<16> Enc, string n> : Register<n> {
    let HwEncoding = Enc;
    let Namespace = "SAMPLE";
}

foreach i = 0-3 in {
    def R#i : R<i, "r"#i >;
}
def SP : SAMPLEReg<13, "sp">;
def LR : SAMPLEReg<14, "lr">;

def GRRegs : RegisterClass<"SAMPLE", [i32], 32,
    (add R0, R1, R2, R3, SP)>;
```

## 工作原理

TableGen工具会把这个.td文件处理成.inc文件，其中寄存器用enum形式表示，进而可以在.cpp文件代码中调用。这些.inc文件会在构建LLVM项目的时候创建。

## 另请参阅

- 关于高级架构（例如x86）中定义寄存器的更多细节，请参见 llvm\_source\_code/lib/Target/X86/X86RegisterInfo.td文件。

# 定义指令集

根据架构特性的不同，架构的指令集也会不同。本节介绍如何定义目标架构的指令集。

## 准备工作

指令目标描述文件会定义3个内容：操作数、汇编字符串、指令格式。指令集的说明文件中包含一系列的定义、输出、使用、输入。这其中会有不同的操作数类，例如，寄存器类、立即数（immediate）类，或者更复杂的register+imm操作数。

这里展示了一个简单的add指令定义，它以3个寄存器作为操作数，2个输入，1个输出。

## 详细步骤

1. 在lib/Target/SAMPLE目录创建新的SAMPLEInstrInfo.td文件：

```
$ vi SAMPLEInstrInfo.td
```

2. 指定两个寄存器操作数之间add指令的操作数、汇编字符串，以及指令格式：

```
def ADDrr : InstSAMPLE<(outs GRRegs:$dst),
  (ins GRRegs:$src1, GRRegs:$src2),
  "add $dst, $src1, $src2",
  [(set i32:$dst, (add i32:$src1, i32:$src2))]>;
```

# 工作原理

add寄存器指令指定\$dst作为结果操作数，其属于通用寄存器类型类；\$src1和\$src2输入是两个输入操作数，它们都属于通用寄存器类；指令的汇编字符串格式为add \$dst, \$src1, \$src2，是32位整型类型。

因此，对两个寄存器执行add指令产生的汇编码如下：

```
add r0, r0, r1
```

这条汇编码表示将r0和r1寄存器中的值相加，结果存储于r0寄存器。

## 另请参阅

- 关于高级架构（例如x86）的各种类型指令集的详细信息，请参见 lib/Target/X86/X86InstrInfo.td文件。
- 关于具体如何定义平台相关的信息，在第8章“实现LLVM后端”会有介绍。一些概念会有重复，但是前面的章节只是简略窥视了一下目标架构的描述方法，算是接下来章节的一个预告。

# 添加机器码描述

LLVM IR包含函数，函数又由基本块（basic block）组成，而基本块由指令组成。下一个逻辑步骤就是把IR抽象块的内容转为指定机器的区块，换言之就是将 LLVM IR 转为指定机器的 MachineFunction、MachineBasicBlock、MachineInstr 实例。这种表示形式以最抽象的形式包含了指令——操作码及一系列的操作数。

## 详细步骤

现在要将 LLVM IR 指令转为机器码指令，即 MachineInstr 类的实例。这是对于机器指令的非常抽象的表示，由一个操作码和多个操作数组成，而操作码仅仅只是无符号整数（unsigned int），只能被指定的后端理解。

我们来看看 MachineInstr.cpp 文件中定义的几个重要函数。

MachineInstr 构造函数如下：

```
MachineInstr::MachineInstr(MachineFunction &MF, const MCInstrDesc &tid, const DebugLoc dl, bool NoImp)
    : MCID(&tid), Parent(nullptr), Operands(nullptr), NumOperands(0),
      Flags(0), AsmPrinterFlags(0),
      NumMemRefs(0), MemRefs(nullptr), debugLoc(dl) {
    // 为预期数量的操作数预留空间
    if (unsigned NumOps = MCID->getNumOperands() +
        MCID->getNumImplicitDefs() + MCID->getNumImplicitUses()) {
        CapOperands = OperandCapacity::get(NumOps);
        Operands = MF.allocateOperandArray(CapOperands);
    }
    if (!NoImp)
        addImplicitDefUseOperands(MF);
}
```

这个构造函数负责创建 MachineInstr 类的对象，并且增加了隐式操

作数。MCInstrDesc类指定了操作数的数量，因此这个构造函数会为操作数预留一定的空间。

另一种重要的函数是addOperand，顾名思义，它为指令增加了指定的操作数。如果是隐式的操作数，则增加到操作数列表末尾；如果是显式的操作数，则增加到显式操作数列表的末尾：

```
void MachineInstr::addOperand(MachineFunction &MF, const
MachineOperand &Op) {
    assert(MCID && "Cannot add operands before providing an instr d
    if (&Op >= Operands && &Op < Operands + NumOperands) {
        MachineOperand CopyOp(Op);
        return addOperand(MF, CopyOp);
    }
    unsigned OpNo = getNumOperands();
    bool isImpReg = Op.isReg() && Op.isImplicit();
    if (!isImpReg && !isInlineAsm()) {
        while (OpNo && Operands[OpNo-1].isReg() && Operands[OpNo- 1].
isImplicit()) {
            --OpNo;
            assert(!Operands[OpNo].isTied() && "Cannot move tied operan
        }
    }
}

#ifndef NDEBUG
bool isMetaDataOp = Op.getType() == MachineOperand::MO_Metadata
assert((isImpReg || Op.isRegMask() || MCID->isVariadic() ||
OpNo < MCID->getNumOperands() || isMetaDataOp) &&
"Trying to add an operand to a machine instr that is al
#endif

MachineRegisterInfo *MRI = getRegInfo();
OperandCapacity OldCap = CapOperands;
MachineOperand *OldOperands = Operands;
if (!OldOperands || OldCap.getSize() == getNumOperands()) {
    CapOperands = OldOperands ? OldCap.getNext() : OldCap.get(1);
    Operands = MF.allocateOperandArray(CapOperands);
    if (OpNo)
        moveOperands(Operands, OldOperands, OpNo, MRI);
}
if (OpNo != NumOperands)
    moveOperands(Operands + OpNo + 1, OldOperands + OpNo, NumOper
        MRI);
++NumOperands;
if (OldOperands != Operands && OldOperands)
```

```

        MF.deallocateOperandArray(OldCap, OldOperands);
        MachineOperand *NewMO = new (Operands + OpNo)
MachineOperand(Op);
        NewMO->ParentMI = this;
        if (NewMO->isReg()) {
            NewMO->Contents.Reg.Prev = nullptr;
        NewMO->TiedTo = 0;
            if (MRI)
                MRI->addRegOperandToUseList(NewMO);
            if (!isImpReg) {
                if (NewMO->isUse()) {
                    int      DefIdx      =      MCID-
>getOperandConstraint(OpNo, MCOI::TIED_TO);
                    if (DefIdx != -1)
                        tieOperands(DefIdx, OpNo);
                }
            }
        }
    }
}

```

目标架构也可能存在内存操作数（内存地址），为了加入内存操作数，需要定义addMemOperands()函数：

```

void MachineInstr::addMemOperand(MachineFunction &MF,
                                  MachineMemOperand *MO) {
    mmo_iterator OldMemRefs = MemRefs;
    unsigned OldNumMemRefs = NumMemRefs;
    unsigned NewNum = NumMemRefs + 1;
    mmo_iterator NewMemRefs = MF.allocateMemRefsArray(NewNum);
    std::copy(OldMemRefs, OldMemRefs + OldNumMemRefs, NewMemRefs);
    NewMemRefs[NewNum - 1] = MO;
    setMemRefs(NewMemRefs, NewMemRefs + NewNum);
}

```

setMemRefs()函数是设置MachineInstr MemRefs列表的主要方法。

## 工作原理

MachineInstr类有一个MCInstrDesc类型的MCID成员来描述指令，一个uint8\_t类型的标识成员，一个内存引用成员（mmo\_iteratorMemRefs），一个std::vector<MachineOperand>操作数的向量成员。至于成员函数，MachineInstr类提供了：

- 用于信息查询的get\*\*和set\*\*函数的基本集合。例如getOpcode()、get Num- Operands()等。
- 整体相关操作。例如isInsideBundle()。
- 检查指令是否具有指定属性。例如isVariadic()、isReturn()、isCall()等。
- 机器指令修改。例如eraseFromParent()。
- 寄存器相关操作。例如ubstituteRegister()、addRegisterKilled()等。
- 机器指令创建方法。例如addOperand()、setDesc()等。

需要注意的是，虽然MachineInstr类提供了创建机器指令的方法，名为BuildMI()的专用有函数，基于MachineInstrBuilder类来说更加方便。

# 实现MachineInstrBuilder类

MachineInstrBuilder类提供了BuildMI()函数，用于创建机器指令。

## 详细步骤

任意的机器指令可以轻松地通过BuildMI函数创建，它位于include/llvm/Code Gen/MachineInstrBuilder.h文件。

例如，你可以在代码片段中使用BuildMI函数实现以下目的。

1. 创建一条指令DestReg = mov 42（在x86汇编码中用mov DestReg,42表示）：

```
MachineInstr *MI = BuildMI(X86::MOV32ri, 1, DestReg).addImm(42);
```

2. 创建同样的指令，但是把它放置于基本块的最后：

```
MachineBasicBlock &MBB =
BuildMI(MBB, X86::MOV32ri, 1, DestReg).addImm(42);
```

3. 还是这条指令，但是把它放置于指定的迭代器之前：

```
MachineBasicBlock::iterator MBBI =
BuildMI(MBB, MBBI, X86::MOV32ri, 1, DestReg).addImm(42)
```

4. 创建一个自循环分支指令：

```
BuildMI(MBB, X86::JNE, 1).addMBB(&MBB);
```

## 工作原理

BuildMI()函数需要指定机器指令的操作数数量，以实现高效的内存分配，同时也需要指定操作数是值还是变量。

# 实现MachineBasicBlock类

与LLVM IR中的基本块相似，MachineBasicBlock类也是由一系列的顺序机器指令组成的，事实上大多数情况下LLVM IR的基本块都是可以映射到MachineBasicBlock类的。但是也存在一些例外，有时候一个 LLVM IR 基本块会映射到多个MachineBasicBlock类。MachineBasicBlock类提供了getBasicBlock()方法，返回它映射到的IR基本块。

## 详细步骤

执行以下步骤添加机器码基本块。

1. getBasicBlock方法返回当前的基本块：

```
const Bas0069cBlock *getBasicBlock() const { return BB; }
```

2. 基本块可能会有前驱和后继，为了记录下这些，定义以下vector：

```
std::vector<MachineBasicBlock *> Predecessors;
std::vector<MachineBasicBlock *> Successors;
```

3. insert函数可以在基本块中插入机器指令：

```
MachineBasicBlock::insert(instr_iterator I, MachineInstr *MI) {
    assert(!MI->isBundledWithPred() && !MI->isBundledWithSucc() && "Cannot
    insert instruction with bundle flags");

    if (I != instr_end() && I->isBundledWithPred()){
        MI->setFlag(MachineInstr::BundledPred);
        MI->setFlag(MachineInstr::BundledSucc);
    }
}
```

```
        return Insts.insert(I, MI);
    }
```

4. SplitCriticalEdge()函数会把临界边界划分到指定的后继者区块，返回新创建的区块，当然，如果不能分隔的话就返回null。这个函数更新LiveVariables、MachineDominatorTree、MachineLoopInfo类：

MachineDominatorTree、MachineLoopInfo类：

```
MachineBasicBlock *
MachineBasicBlock::SplitCriticalEdge(MachineBasicBlock
*Succ, Pass *P) {
...
...
...
}
```

此函数的实现位于lib/CodeGen/MachineBasicBlock.cpp文件中。

## 工作原理

如之前所列举的，MachineBasicBlock类的接口定义由不同类型的典型函数组成。它记载了许多机器指令，例如typedef ilist<MachineInstr>指令、Insts指令，以及原始的LLVM 基本块。它提供了如下方法。

- 基本块信息查询，例如getBasicBlock()、setHasAddressTaken()。
- 基本块修改，例如moveBefore()、moveAfter()、addSuccessor()。
- 指令修改，例如push\_back()、insertAfter()等。

## 另请参阅

- 关于MachineBasicBlock类的详细信息, 请参见/lib/CodeGen/Machine- BasicBlock.cpp文件。

# 实现MachineFunction类

与LLVM IR的FunctionBlock类相似，MachineFunction类也包含了一系列的MachineBasicBlock类。MachineFunction类的信息会映射到LLVM IR函数，作为指令选择器的输入。除基本块列表之外，MachineFunction类还包含了MachineConstantPool、MachineFrameInfo、MachineFunctionInfo、MachineRegisterInfo类。

## 详细步骤

在MachineFunction类中定义了许多执行特定任务的函数，也有许多记录信息的类对象成员，如下。

- RegInfo记录函数中使用的寄存器信息

```
MachineRegisterInfo *RegInfo;
```

- MachineFrameInfo记录栈上分配的对象：

```
MachineFrameInfo *FrameInfo;
```

- ConstantPool记录溢出（spill）到内存的常量：

```
MachineConstantPool *ConstantPool;
```

- JumpTableInfo记录switch指令的跳转表：

```
MachineJumpTableInfo *JumpTableInfo;
```

- 函数中的基本块列表：

```
typedef ilist<MachineBasicBlock> BasicBlockListType;  
BasicBlockListType BasicBlocks;
```

- getFunction函数返回当前机器码表示的LLVM函数：

```
const Function *getFunction() const { return Fn; }
```

- CreateMachineInstr分配新的MachineInstr类：

```
MachineInstr *CreateMachineInstr(const MCInstrDesc &MCID,  
DebugLoc DL,  
bool NoImp = false);
```

## 工作原理

MachineFunction类主要是保存MachineBasicBlock对象的列表  
(`typedef ilist<MachineBasicBlock> BasicBlockListType;`  
`BasicBlockListType BasicBlocks;`)，为检索机器函数和修改基本块成员  
中的对象定义提供了多个方法。还需要着重注意的一点是，  
MachineFunction类还为函数中的基本块维护了一个控制流图（**control  
flow graph——CFG**）。这个控制流图为许多优化和分析提供了重要的  
控制流信息。因此理解MachineFunction对象及相应的控制流图的构建是  
相当重要的。

## 另请参阅

- 关于MachineFunction类的具体实现，请参见lib/CodeGen/Machine-Function.cpp文件。

# 编写指令选择器

为了进行指令选择，LLVM用一种底层的数据相关的DAG结构——SelectionDAG来表示 LLVM IR。在SelectionDAG上能够实施各种简化的、平台相关的优化。SelectionDAG是平台无关的、简单的、强大的表示，能够在把IR lowering到特定平台时发挥重要作用。

## 详细步骤

下面的代码展示了SelectionDAG类的基本结构，包括它的数据成员，从类中设置或检索有效信息的各种函数，SelectionDAG类定义如下：

```
class SelectionDAG {
    const TargetMachine &TM;
    const TargetLowering &TLI;
    const TargetSelectionDAGInfo &TSI;
    MachineFunction *MF;
    LLVMContext *Context;
    CodeGenOpt::Level OptLevel;

    SDNode EntryNode;
    // Root—整个DAG的根节点
    SDValue Root;

    // AllNodes—当前DAG节点链表
    ilist<SDNode> AllNodes;

    // NodeAllocatorType —我们使用的分配SDNode的分配器类型

    typedef RecyclingAllocator<BumpPtrAllocator, SDNode,
        sizeof(LargestSDNode),
        AlignOf<MostAlignedSDNode>::Alignment>
    NodeAllocatorType;

    BumpPtrAllocator OperandAllocator;

    BumpPtrAllocator Allocator;
```

```

SDNodeOrdering *Ordering;

public:

struct DAGUpdateListener {
    DAGUpdateListener *const Next;
    SelectionDAG &DAG;
    explicit DAGUpdateListener(SelectionDAG &D)
        : Next(D.UpdateListeners), DAG(D) {
        DAG.UpdateListeners = this;
    }
};

private:

friend struct DAGUpdateListener;

DAGUpdateListener *UpdateListeners;
void init(MachineFunction &mf);

// 设置SelectionDAG根节点的函数
const SDValue &setRoot(SDValue N) {
    assert((!N.getNode() || N.getValueType() == MVT::Other) &&
           "DAG root value is not a chain!");
    if (N.getNode())
        checkForCycles(N.getNode());
    Root = N;
    if (N.getNode())
        checkForCycles(this);
    return Root;
}

void Combine(CombineLevel Level, AliasAnalysis &AA,
CodeGenOpt::Level OptLevel);

SDValue getConstant(uint64_t Val, EVT VT, bool isTarget = false);

SDValue getConstantFP(double Val, EVT VT, bool isTarget = false);

SDValue getGlobalAddress(const GlobalValue *GV, DebugLoc DL, EVT
VT, int64_t offset = 0, bool isTargetGA = false,
unsigned char TargetFlags = 0);

SDValue getFrameIndex(int FI, EVT VT, bool isTarget = false);

```

```
SDValue getTargetIndex(int Index, EVT VT, int64_t Offset = 0,
unsigned char TargetFlags = 0);

// 此函数返回与这个MachineBasicBlock对应的基本块

SDValue getBasicBlock(MachineBasicBlock *MBB);

SDValue getBasicBlock(MachineBasicBlock *MBB, DebugLoc dl);
SDValue getExternalSymbol(const char *Sym, EVT VT);

SDValue getExternalSymbol(const char *Sym, DebugLoc dl, EVT VT);

SDValue getTargetExternalSymbol(const char *Sym, EVT VT,
unsigned char TargetFlags = 0);

// 此函数返回这个SelectionDAG节点对应的值的类型
SDValue getValueType(EVT);

SDValue getRegister(unsigned Reg, EVT VT);

SDValue getRegisterMask(const uint32_t *RegMask);

SDValue getEHLLabel(DebugLoc dl, SDValue Root, MCSymbol *Label);

SDValue getBlockAddress(const BlockAddress *BA, EVT VT,
int64_t Offset = 0, bool isTarget = false,
unsigned char TargetFlags = 0);

SDValue getSExtOrTrunc(SDValue Op, DebugLoc DL, EVT VT);

SDValue getZExtOrTrunc(SDValue Op, DebugLoc DL, EVT VT);

SDValue getZeroExtendInReg(SDValue Op, DebugLoc DL, EVT SrcTy);

SDValue getNOT(DebugLoc DL, SDValue Val, EVT VT);

// 此函数获得SelectionDAG节点
SDValue getNode(unsigned Opcode, DebugLoc DL, EVT VT);

SDValue getNode(unsigned Opcode, DebugLoc DL, EVT VT, SDValue N);

SDValue getNode(unsigned Opcode, DebugLoc DL, EVT VT, SDValue N1,
SDValue N2);

SDValue getNode(unsigned Opcode, DebugLoc DL, EVT VT,
SDValue N1, SDValue N2, SDValue N3);

SDValue getMemcpy(SDValue Chain, DebugLoc dl, SDValue Dst, SDValu
```

```
Src, SDValue Size, unsigned Align, bool isVol, bool AlwaysInline,
MachinePointerInfo DstPtrInfo, MachinePointerInfo SrcPtrInfo);

SDValue getAtomic(unsigned Opcode, DebugLoc dl, EVT MemVT, SDValue
SDValue Ptr, SDValue Cmp, SDValue Swp,
MachinePointerInfo PtrInfo, unsigned Alignment,
AtomicOrdering Ordering,
SynchronizationScope SynchScope);

SDNode *UpdateNodeOperands(SDNode *N, SDValue Op);

SDNode *UpdateNodeOperands(SDNode *N, SDValue Op1, SDValue Op2);

SDNode *UpdateNodeOperands(SDNode *N, SDValue Op1, SDValue Op2,
SDValue Op3);

SDNode *SelectNodeTo(SDNode *N, unsigned TargetOpc, EVT VT);

SDNode *SelectNodeTo(SDNode *N, unsigned TargetOpc, EVT VT, SDVal

SDNode *SelectNodeTo(SDNode *N, unsigned TargetOpc, EVT VT,
SDValue Op1, SDValue Op2);

MachineSDNode *getMachineNode(unsigned Opcode, DebugLoc dl, EVT V
MachineSDNode *getMachineNode(unsigned Opcode, DebugLoc dl, EVT V
SDValue Op1);

MachineSDNode *getMachineNode(unsigned Opcode, DebugLoc dl, EVT V
SDValue Op1, SDValue Op2);

void ReplaceAllUsesWith(SDValue From, SDValue Op);

void ReplaceAllUsesWith(SDNode *From, SDNode *To);

void ReplaceAllUsesWith(SDNode *From, const SDValue *To);

bool isBaseWithConstantOffset(SDValue Op) const;

bool isKnownNeverNaN(SDValue Op) const;

bool isKnownNeverZero(SDValue Op) const;

bool isEqualTo(SDValue A, SDValue B) const;

SDValue UnrollVectorOp(SDNode *N, unsigned ResNE = 0);

bool isConsecutiveLoad(LoadSDNode *LD, LoadSDNode *Base,
```

```

unsigned Bytes, int Dist) const;

unsigned InferPtrAlignment(SDValue Ptr) const;

private:

bool RemoveNodeFromCSEMaps(SDNode *N);

void AddModifiedNodeToCSEMaps(SDNode *N);

SDNode *FindModifiedNodeSlot(SDNode *N, SDValue Op, void *&Insert);

SDNode *FindModifiedNodeSlot(SDNode *N, SDValue Op1, SDValue Op2,
void *&InsertPos);

SDNode *FindModifiedNodeSlot(SDNode *N, const SDValue *Ops,
unsigned NumOps, void *&InsertPos);

SDNode *UpdateDebugLocOnMergedSDNode(SDNode *N, DebugLoc loc);

void DeleteNodeNotInCSEMaps(SDNode *N);

void DeallocateNode(SDNode *N);
unsigned getEVTAlignment(EVT MemoryVT) const;

void allnodes_clear();

std::vector<SDVTLList> VTList;

std::vector<CondCodeSDNode*> CondCodeNodes;

std::vector<SDNode*> ValueTypeNodes;

std::map<EVT, SDNode*, EVT::compareRawBits> ExtendedValueTypeNode
StringMap<SDNode*> ExternalSymbols;

std::map<std::pair<std::string, unsigned char>, SDNode*>
TargetExternalSymbols;
};

```

## 工作原理

之前的代码展示了SelectionDAG类的多个平台无关的创建多种

SDNode的方法，以及检索、计算SelectionDAG图节点有用信息的方法，由SelectionDAG类提供的更新、替换方法。这些方法大多数定义于SelectionDAG.cpp文件中。需要注意的是，SelectionDAG图及它的节点类型SDNode，被设计用于既可以存储平台无关的信息，也可以存储特定平台的信息。例如，SDNode类的isTargetOpcode()和isMachineOpcode()方法用于判断操作码是否为目标平台的操作码或者平台无关的机器码。这是因为虽然是同一种类类型NodeType，但是范围不同，所以既用于表达真实平台的操作码，也用于表达机器指令的操作码。

# 合法化SelectionDAG

SelectionDAG是指令和操作数的、平台无关的表示。但是，目标平台往往不能完全支持其中的指令和数据类型。因此，我们把初始构建的SelectionDAG图中目标平台不支持的指令称为非法指令。非法DAG需要经过DAG合法化的步骤，转为目标架构完全支持的合法DAG。

DAG合法化有两种方式来把不支持的数据类型转为支持的：一种是提升（promoting）将小的数——据类型提升为大的数据类型，另一种就是把大的数据类型缩减为小的数据类型。例如，如果目标架构仅支持32位整数数据类型，那么对于DAG中的8位整数或16位整数这样小的数据类型，就需要提升到32位整数类型来表达。而大的数据类型，例如64位整数，就扩展到用两个32位整数数据类型来表达。在提升和扩展数据类型的过程中，Sign和zero也要加上，使得结果保持一致。

类似地，向量类型可以通过切分为更小的向量（从向量中提取元素）或者拓宽小的向量类型转为大的、已支持的向量类型来合法化。如果目标架构不支持向量，那么可以把IR中向量的每一个元素抽取成标量形式。

合法化阶段也能命令这种类型的寄存器类来支持给定的数据。

## 详细步骤

SelectionDAGLegalize类有多个数据成员，用来记录合法的节点，以及合法化节点的各种方法。下面的合法化阶段代码快照来自LLVM 代码库，展示了合法化实现的基本框架：

```
namespace {
class SelectionDAGLegalize : public
SelectionDAG::DAGUpdateListener {
    const TargetMachine &TM;
```

```

const TargetLowering &TLI;

SelectionDAG &DAG;

SelectionDAG::allnodes_iterator LegalizePosition;

// LegalizedNodes: 已经合法化的节点集合
SmallPtrSet<SDNode *, 16> LegalizedNodes;

public:
explicit SelectionDAGLegalize(SelectionDAG &DAG);
void LegalizeDAG();

private:

void LegalizeOp(SDNode *Node);

SDValue OptimizeFloatStore(StoreSDNode *ST);

// 合法化加载操作
void LegalizeLoadOps(SDNode *Node);

// 合法化存储操作
void LegalizeStoreOps(SDNode *Node);

// 操作Selection DAG节点的主要合法化函数
void SelectionDAGLegalize::LegalizeOp(SDNode *Node) {
// 目标节点（常数）需要更进一步地合理化
    if (Node->getOpcode() == ISD::TargetConstant)
        return;

    for (unsigned i = 0, e = Node->getNumValues(); i != e; ++i)
        assert(TLI.getTypeAction(*DAG.getContext(), Node-
>getValueType(i))
== TargetLowering::TypeLegal && "Unexpected illegal type!");

    for (unsigned i = 0, e = Node->getNumOperands(); i != e; ++i)
        assert((TLI.getTypeAction(*DAG.getContext(),
Node-
>getOperand(i).getValueType()) == TargetLowering::TypeLegal ||
Node->getOperand(i).getOpcode() == ISD::TargetConstant) &&
"Unexpected illegal type!");

    TargetLowering::LegalizeAction Action = TargetLowering::Legal;
    bool SimpleFinishLegalizing = true;

    // 基于指令操作码的合法化
    switch (Node->getOpcode()) {

```

```

case ISD::INTRINSIC_W_CHAIN:
case ISD::INTRINSIC_WO_CHAIN:
case ISD::INTRINSIC_VOID:
case ISD::STACKSAVE:
    Action = TLI.getOperationAction(Node->getOpcode(),
MVT::Other);
    break;
...
...
}

```

## 工作原理

SelectionDAGLegalize类的许多成员函数都依赖目标平台的信息，例如LegalizeOp，这些信息由SelectionDAGLegalize类的const TargetLowering &TLI函数提供（其他的成员也许会依赖const TargetMachine &TM函数）。我们来看看合法化过程是如何进行的。

具体的合法化有两种：类型合法化和指令合法化。首先来看看类型合法化。使用如下命令创建一个test.ll文件：

```

$ cat test.ll
define i64 @test(i64 %a, i64 %b, i64 %c) {
    %add = add nsw i64 %a, %b
    %div = sdiv i64 %add, %c
    ret i64 %div
}

```

这个例子中的数据类型是i64，对于x86平台来说，仅仅支持32位数据类型，因此i64这个数据类型是非法的。为了运行这段代码，数据类型需要转为i32，这在DAG合法化阶段完成。

执行以下命令，查看类型合法化之前的DAG：

```
$ llc -view-dag-combine1-dags test.ll
```

下图是类型合法化之前的DAG：



执行以下命令，查看类型合法化之后的DAG:

```
$ llc -view-dag-combine2-dags test.ll
```

下图是类型合法化之后的DAG:



如果仔细观察DAG节点，你会发现在合法化之前的每个操作都有i64类型，这是因为IR有i64数据类型，而DAG节点和IR指令是一一对应的。但是目标机器x86仅支持i32类型（32位整数类型）。在DAG合法化阶段，不支持的i64类型被转为已支持的i32类型。这个操作称为类型扩展（expanding）——将较大的类型分解为较小的类型。例如，在仅支持i32值的目标平台上，i64类型的值都被分解成一对i32类型的值。因此，在合法化之后，所有的操作仅包含i32数据类型了。

接下来让我们看看指令是如何合法化的，用以下命令创建test.ll文件：

```
$ cat test.ll
define i32 @test(i32 %a, i32 %b, i32 %c) {
  %add = add nsw i32 %a, %b
  %div = sdiv i32 %add, %c
  ret i32 %div
}
```

执行以下命令，查看合法化之前的DAG：

```
$ llc -view-dag-combine1-dags test.ll
```

下图是合法化之前的DAG：



执行以下命令，查看合法化之后的DAG:

```
$ llc -view-dag-combine2-dags test.ll
```

下图是合法化之后的DAG:



在指令合法化之前，DAG中包含sdiv指令。但对于x86目标平台来说，是不支持sdiv指令的，因此它是非法的。但是，由于x86支持sdivrem指令，在合法化阶段sdiv指令就被转为了sdivrem指令，如前面的两个DAG所示。

# 优化SelectionDAG

SelectionDAG表达以节点的形式存储了数据和指令信息。与LLVM IR的InstCombinePass类似，这些节点也可以合并并优化，得到最小化的SelectionDAG。不过不仅只有DAGCombine操作来优化SelectionDAG。在DAGLegalize（合法化DAG）过程中可能会产生一些冗余的DAG节点，这也需要在随后的DAG优化Pass消除。最后得到的SelectionDAG会更加简洁高效。

## 详细步骤

在DAGCombine类中有许多类似visit\*\*()的成员函数，通过折叠（folding）、重调度（reordering）、合并（combining）、修改SDNode节点来执行优化。需要注意的是，从DAGCombiner的构造函数中可以猜到，我们可以猜测一些优化需要别名分析的信息。

```
class DAGCombiner {
SelectionDAG &DAG;
const TargetLowering &TLI;
CombineLevel Level;
CodeGenOpt::Level OptLevel;
bool LegalOperations;
bool LegalTypes;

SmallPtrSet<SDNode*, 64> WorkListContents;
SmallVector<SDNode*, 64> WorkListOrder;

AliasAnalysis &AA;

// 将SDNodes用户加入worklist
void AddUsersToWorkList(SDNode *N) {
    for (SDNode::use_iterator UI = N->use_begin(),
        UE = N->use_end(); UI != UE; ++UI)
        AddToWorkList(*UI);
}
SDValue visit(SDNode *N);
```

```

public:

void AddToWorkList(SDNode *N) {
    WorkListContents.insert(N);
    WorkListOrder.push_back(N);
}
void removeFromWorkList(SDNode *N) {
    WorkListContents.erase(N);
}

// SDNode合并操作
SDValue CombineTo(SDNode *N, const SDValue *To, unsigned NumTo,
bool AddTo = true);

SDValue CombineTo(SDNode *N, SDValue Res, bool AddTo = true) {
    return CombineTo(N, &Res, 1, AddTo);
}
SDValue CombineTo(SDNode *N, SDValue Res0, SDValue Res1,
bool AddTo = true) {
    SDValue To[] = { Res0, Res1 };
    return CombineTo(N, To, 2, AddTo);
}
void CommitTargetLoweringOpt(const TargetLowering::TargetLowering
&TLO);

private:

bool SimplifyDemandedBits(SDValue Op) {
    unsigned BitWidth =
Op.getValueType().getScalarType().getSizeInBits();
    APIInt Demanded = APIInt::getAllOnesValue(BitWidth);
    return SimplifyDemandedBits(Op, Demanded);
}
bool SimplifyDemandedBits(SDValue Op, const APIInt &Demanded);

bool CombineToPreIndexedLoadStore(SDNode *N);

bool CombineToPostIndexedLoadStore(SDNode *N);

void ReplaceLoadWithPromotedLoad(SDNode *Load, SDNode *ExtLoad);

SDValue PromoteOperand(SDValue Op, EVT PVT, bool &Replace);

SDValue SExtPromoteOperand(SDValue Op, EVT PVT);

SDValue ZExtPromoteOperand(SDValue Op, EVT PVT);

SDValue PromoteIntBinOp(SDValue Op);

```

```

SDValue PromoteIntShiftOp(SDValue Op);

SDValue PromoteExtend(SDValue Op);

bool PromoteLoad(SDValue Op);
void ExtendSetCCUses(SmallVector<SDNode*, 4> SetCCs,
SDValue Trunc, SDValue ExtLoad, DebugLoc DL,
ISD::NodeType ExtType);

SDValue combine(SDNode *N);

// 操作由SD节点表示的指令的多个visit函数，与IR层面的指令组合相似
SDValue visitTokenFactor(SDNode *N);
SDValue visitMERGE_VALUES(SDNode *N);

SDValue visitADD(SDNode *N);
SDValue visitSUB(SDNode *N);
SDValue visitADDC(SDNode *N);
SDValue visitSUBC(SDNode *N);
SDValue visitADDE(SDNode *N);
SDValue visitSUBE(SDNode *N);
SDValue visitMUL(SDNode *N);

public:

DAGCombiner(SelectionDAG &D, AliasAnalysis &A, CodeGenOpt::Level
: DAG(D), TLI(D.getTargetLoweringInfo()), Level(BeforeLegalizeTyp
OptLevel(OL), LegalOperations(false), LegalTypes(false), AA(A))

// 对以下操作的Selection DAG转换
SDValue DAGCombiner::visitMUL(SDNode *N) {
    SDValue N0 = N->getOperand(0);
    SDValue N1 = N->getOperand(1);
    ConstantSDNode *N0C = dyn_cast<ConstantSDNode>(N0);
    ConstantSDNode *N1C = dyn_cast<ConstantSDNode>(N1);
    EVT VT = N0.getValueType();
    if (VT.isVector()) {
        SDValue FoldedVOp = SimplifyVBinOp(N);
        if (FoldedVOp.getNode()) return FoldedVOp;
    }
    if (N0.getOpcode() == ISD::UNDEF || N1.getOpcode() == ISD::UNDE
        return DAG.getConstant(0, VT);

    if (N0C && N1C)
        return DAG.FoldConstantArithmetic(ISD::MUL, VT, N0C, N1C);

    if (N0C && !N1C)

```

```

    return DAG.getNode(ISD::MUL, N->getDebugLoc(), VT, N1, N0);

if (N1C && N1C->isNullValue())
    return N1;

if (N1C && N1C->isAllOnesValue())
    return DAG.getNode(ISD::SUB, N->getDebugLoc(), VT,
DAG.getConstant(0, VT), N0);
if (N1C && N1C->getAPIntValue().isPowerOf2())
    return DAG.getNode(ISD::SHL, N->getDebugLoc(), VT, N0,
DAG.getConstant(N1C->getAPIntValue().logBase2(),
getShiftAmountTy(N0.getValueType())));

if (N1C && (-N1C->getAPIntValue()).isPowerOf2()) {
    unsigned Log2Val = (-N1C->getAPIntValue()).logBase2();
    return DAG.getNode(ISD::SUB, N->getDebugLoc(), VT,
DAG.getConstant(0, VT),
DAG.getNode(ISD::SHL, N->getDebugLoc(), VT, N0,
DAG.getConstant(Log2Val, getShiftAmountTy(N0.getValueType())))
}

if (N1C && N0.getOpcode() == ISD::SHL &&
isa<ConstantSDNode>(N0.getOperand(1))) {
    SDValue C3 = DAG.getNode(ISD::SHL, N-
>getDebugLoc(), VT, N1,
N0.getOperand(1));
    AddToWorkList(C3.getNode());
    return DAG.getNode(ISD::MUL, N->getDebugLoc(), VT,
N0.getOperand(0), C3);
}

if (N0.getOpcode() == ISD::SHL &&
isa<ConstantSDNode>(N0.getOperand(1)) &&
N0.getNode()->hasOneUse()) {
    Sh = N0; Y = N1;
} else if (N1.getOpcode() == ISD::SHL &&
isa<ConstantSDNode>(N1.getOperand(1)) &&
N1.getNode()->hasOneUse()) {
    Sh = N1; Y = N0;
}
if (Sh.getNode()) {
    SDValue Mul = DAG.getNode(ISD::MUL, N->getDebugLoc(), VT,
Sh.getOperand(0), Y);
    return DAG.getNode(ISD::SHL, N->getDebugLoc(), VT,
Mul, Sh.getOperand(1));
}
}

if (N1C && N0.getOpcode() == ISD::ADD && N0.getNode()->hasOne

```

```
    isa<ConstantSDNode>(N0.getOperand(1)))
    return DAG.getNode(ISD::ADD, N->getDebugLoc(), VT,
DAG.getNode(ISD::MUL, N0.getDebugLoc(),
    VT, N0.getOperand(0), N1), DAG getNode(ISD::MUL,
N1.getDebugLoc(), VT, N0.getOperand(1), N1));

    SDValue      RMUL      =      ReassociateOps(ISD::MUL,      N-
>getDebugLoc(), N0, N1);

    if (RMUL.getNode() != 0) return RMUL;
    return SDValue();
}
```

## 工作原理

如前面的代码所示，一些DAGCombine Pass会寻找特定的模式，然后把这些模式折叠成一个DAG。基本上这样可以减少DAG的数量，同时lowering DAG。得到的结果是优化过的SelectionDAG类。

## 另请参阅

- 关于优化的SelectionDAG类的具体实现，请参见 lib/CodeGen/Selection DAG/DAGCombiner.cpp文件。

# 基于DAG的指令选择

在合法化和DAG合并之后，SelectionDAG已经被优化了。但指令依旧是平台无关的，需要映射到平台相关的指令。而指令选择阶段将采用目标无关的DAG节点作为输入，匹配特定的模式，将其映射到特定平台的DAG输出节点。

TableGen DAG指令选择器从.td文件读入指令模式，自动化构建部分的模式匹配代码。

## 详细步骤

SelectionDAGISel是在SelectionDAG的基础上，进行基于模式匹配的指令选择器的通用基类，它继承了MachineFunctionPass类，有多个函数用于判断操作（例如折叠）的合法性和优化收益。下面是这个类的基本框架：

```
class SelectionDAGISel : public MachineFunctionPass {
public:
    const TargetMachine &TM;
    const TargetLowering &TLI;
    const TargetLibraryInfo *LibInfo;
    FunctionLoweringInfo *FuncInfo;
    MachineFunction *MF;
    MachineRegisterInfo *RegInfo;
    SelectionDAG *CurDAG;
    SelectionDAGBuilder *SDB;
    AliasAnalysis *AA;
    GCFunctionInfo *GFI;
    CodeGenOpt::Level OptLevel;
    static char ID;

    explicit SelectionDAGISel(const TargetMachine &tm,
        CodeGenOpt::Level OL = CodeGenOpt::Default);

    virtual ~SelectionDAGISel();
```

```
const TargetLowering &getTargetLowering() { return TLI; }
virtual void getAnalysisUsage(AnalysisUsage &AU) const;

virtual bool runOnMachineFunction(MachineFunction &MF);

virtual void EmitFunctionEntryCode() {}

virtual void PreprocessISelDAG() {}

virtual void PostprocessISelDAG() {}

virtual SDNode *Select(SDNode *N) = 0;

virtual bool SelectInlineAsmMemoryOperand(const SDValue &Op,
char ConstraintCode,
std::vector<SDValue> &OutOps) {
    return true;
}

virtual bool IsProfitableToFold(SDValue N, SDNode *U, SDNode *Root,
static bool IsLegalToFold(SDValue N, SDNode *U, SDNode *Root,
CodeGenOpt::Level OptLevel,
bool IgnoreChains = false);

enum BuiltinOpcodes {
OPC_Scope,
OPC_RecordNode,
OPC_CheckOpcode,
OPC_SwitchOpcode,
OPC_CheckFoldableChainNode,
OPC_EmitInteger,
OPC_EmitRegister,
OPC_EmitRegister2,
OPC_EmitConvertToTarget,
OPC_EmitMergeInputChains,
};

static inline int getNumFixedFromVariadicInfo(unsigned Flags) {
    return ((Flags&OPFL_VariadicInfo) >> 4)-1;
}

protected:
// DAGSize—进行指令选择的DAG的大小
unsigned DAGSize;

void ReplaceUses(SDValue F, SDValue T) {
    CurDAG->ReplaceAllUsesOfValueWith(F, T);
}
```

```

void ReplaceUses(const SDValue *F, const SDValue *T, unsigned Num
    CurDAG->ReplaceAllUsesOfValuesWith(F, T, Num);
}

void ReplaceUses(SDNode *F, SDNode *T) {
    CurDAG->ReplaceAllUsesWith(F, T);
}

void SelectInlineAsmMemoryOperands(std::vector<SDValue> &Ops);

public:
bool CheckAndMask(SDValue LHS, ConstantSDNode *RHS,
int64_t DesiredMasks) const;

bool CheckOrMask(SDValue LHS, ConstantSDNode *RHS,
int64_t DesiredMasks) const;

virtual bool CheckPatternPredicate(unsigned PredNo) const {
    llvm_unreachable("Tblgen should generate the implementation of
}

virtual bool CheckNodePredicate(SDNode *N, unsigned PredNo) const
    llvm_unreachable("Tblgen should generate the implementation of
}

private:

SDNode *Select_INLINEASM(SDNode *N);

SDNode *Select_UNDEF(SDNode *N);

void CannotYetSelect(SDNode *N);

void DoInstructionSelection();

SDNode *MorphNode(SDNode *Node, unsigned TargetOpc, SDVTList VTs,
const SDValue *Ops, unsigned NumOps, unsigned EmitNodeInfo);

void PrepareEHLandingPad();

void SelectAllBasicBlocks(const Function &Fn);

bool TryToFoldFastISelLoad(const LoadInst *LI, const Instruction
*FoldInst, FastISel *FastIS);

void FinishBasicBlock();

void SelectBasicBlock(BasicBlock::const_iterator Begin,

```

```
BasicBlock::const_iterator End,
bool &HadTailCall);

void CodeGenAndEmitDAG();

void LowerArguments(const BasicBlock *BB);

void ComputeLiveOutVRegInfo();
    ScheduleDAGSDNodes *CreateScheduler();
};
```

## 工作原理

指令选择阶段需要把平台无关的指令转换为特定平台的指令。TableGen类帮助选择特定平台的指令。这个阶段基本就是匹配平台无关的输入节点，输出特定平台支持的节点。

CodeGenAndEmitDAG()函数调用DoInstructionSelection()函数，遍历DAG节点并对每个节点调用Select()函数，如下：

```
SDNode *ResNode = Select(Node);
```

Select()函数是需要由特定平台实现的抽象方法。x86目标平台实现了X86DAGToDAGISel::Select()函数。这个函数拦截一部分节点进行手动匹配，而大部分工作则委托给X86DAGToDAGISel::SelectCode()函数完成。

X86DAGToDAGISel::SelectCode函数由TableGen自动生成。它包含一个匹配表，随后调用SelectionDAGISel::SelectCodeCommon()泛型函数，并把匹配表传给它。

例如：

```
$ cat test.ll
define i32 @test(i32 %a, i32 %b, i32 %c) {
    %add = add nsw i32 %a, %b
    %div = sdiv i32 %add, %c
```

```
    ret i32 %div  
}
```

执行以下命令，查看指令选择之前的DAG：

```
$ llc -view-isel-dags test.ll
```

下图是指令选择之前的DAG：



执行以下命令，查看指令选择之后的DAG：

```
$ llc -view-sched-dags test.ll
```

下图是指令选择之后的DAG



可以看到，在指令选择阶段Load操作被转换为MOV32rm机器码。

## 另请参阅

- 关于指令选择的具体实现，请参见lib/CodeGen/SelectionDAG/SelectionDAGISel.cpp文件。

# 基于SelectionDAG的指令调度

到现在为止，我们的SelectionDAG节点已经由目标平台所支持的指令和操作数所组成了。但是，代码仍然是DAG形式的。目标架构以序列执行代码。所以，下一步就是对SelectionDAG的节点进行调度。

调度器负责安排DAG中指令的执行顺序。在此过程中，它考虑各种启发式优化，例如寄存器压力，以优化指令执行顺序、最小化指令执行的延迟时间。在安排了DAG节点的执行顺序之后，DAG节点转为MachineInstrs列表并且SelectionDAG节点被解构。

## 详细步骤

在ScheduleDAG.h中定义了多个基本结构，在ScheduleDAG.cpp文件中实现。ScheduleDAG类就是一个调度器基类，被其他调度器继承，它仅仅提供了关于图的修改操作，例如迭代器、DFS、拓扑排序、移动周围节点的函数等。

```
class ScheduleDAG {
public:
    const TargetMachine &TM;          // 目标平台处理器
    const TargetInstrInfo *TII;        // 目标平台指令
    const TargetRegisterInfo *TRI;      // 目标平台寄存器信息
    MachineFunction &MF;              // 机器码函数
    MachineRegisterInfo &MRI;          // 虚拟/真实寄存器映射
    std::vector<SUnit> SUnits;        // 调度单元
    SUnit EntrySU;                  // 区域进入的特定节点
    SUnit ExitSU;                   // 区域退出的特定节点

    explicit ScheduleDAG(MachineFunction &mf);
    virtual ~ScheduleDAG();
    void clearDAG();

    const MCInstrDesc *getInstrDesc(const SUnit *SU) const {
        if (SU->isInstr()) return &SU->getInstr()->getDesc();
    }
}
```

```

        return getNodeDesc(SU->getNode());
    }
    virtual void dumpNode(const SUnit *SU) const = 0;

private:

const MCInstrDesc *getNodeDesc(const SDNode *Node) const;
};

class SUnitIterator : public
std::iterator<std::forward_iterator_tag,
SUnit, ptrdiff_t> {
};

template <> struct GraphTraits<SUnit*> {
    typedef SUnit NodeType;
    typedef SUnitIterator ChildIteratorType;
    static inline NodeType *getEntryNode(SUnit *N) {
        return N;
    }
    static inline ChildIteratorType child_begin(NodeType *N) {
        return SUnitIterator::begin(N);
    }
    static inline ChildIteratorType child_end(NodeType *N) {
        return SUnitIterator::end(N);
    }
};

template <> struct GraphTraits<ScheduleDAG*> : public
GraphTraits<SUnit*> {
...};

// 对DAG的拓扑排序，把DAG转成线性的指令集合
class ScheduleDAGTopologicalSort {
    std::vector<SUnit> &SUnits;
    SUnit *ExitSU;
    std::vector<int> Index2Node;
    std::vector<int> Node2Index;
    BitVector Visited;
// 为了进行拓扑排序，对DAG进行DFS
    void DFS(const SUnit *SU, int UpperBound, bool& HasLoop);
    void Shift(BitVector& Visited, int LowerBound, int UpperBound);

    void Allocate(int n, int index);

public:

```

```
ScheduleDAGTopologicalSort(std::vector<SUnit> &SUnits, SUnit *E  
void InitDAGTopologicalSorting();  
bool IsReachable(const SUnit *SU, const SUnit *TargetSU);  
bool WillCreateCycle(SUnit *SU, SUnit *TargetSU);  
void AddPred(SUnit *Y, SUnit *X);  
void RemovePred(SUnit *M, SUnit *N);  
typedef std::vector<int>::iterator iterator;  
typedef std::vector<int>::const_iterator const_iterator;  
iterator begin() { return Index2Node.begin(); }  
const_iterator begin() const { return Index2Node.begin(); }  
iterator end() { return Index2Node.end();}}
```

## 工作原理

调度算法实现了SelectionDAG类中的指令调度，包括拓扑排序、深度优先搜索、操作函数、移动节点、指令列表迭代等算法。它会考虑各种启发式算法，包括寄存器压力、溢出开销、生存周期分析等，来确定最可能的指令调度顺序。

## 另请参阅

- 关于指令调用的详细实现，请参见lib/CodeGen/SelectionDAG目录的ScheduleDAGSDNodes.cpp、ScheduleDAGSDNodes.h、ScheduleDAGRR-List.cpp、ScheduleDAGFast.cpp、Schedule DAGVLIW.cpp文件。

---

**[1]**寄存器溢出：寄存器溢出和栈溢出（stack overflow）不是同一个概念。在基于寄存器的执行模型中，寄存器溢出是由于机器的寄存器数量限制，导致部分变量无法分配于寄存器，因此需要将之溢出到主存中，在使用之前加载到寄存器中，之后再存回主存。——译者注

**[2]**把代码发射到内存：传统的代码编译会得到一个可执行文件，在程序执行时这个文件中的代码和数据会加载到内存，然后执行。而JIT则跳过了可执行文件，直接把代码放到内存中指定的位置来执行，以达到动态执行的效果。——译者注

# 第7章 机器码优化

本章涵盖以下话题：

- 消除机器码的公共子表达式
- 活动周期分析
- 寄存器分配
- 插入头尾代码
- 代码发射
- 尾调用优化
- 兄弟调用优化

# 概述

目前生成的机器码还没有映射到真实的目标架构的寄存器，因为现在的寄存器还仅仅是虚拟寄存器，它的数量无限，所以说生成的机器码是SSA形式的。但是，目标平台的寄存器是数量有限的，因此，还需要寄存器分配算法进行许多启发式计算，来以一种最佳的方式把无限的寄存器集合映射到有限的物理寄存器集合上。

不过在寄存器分配之前，代码还有优化的机会，而SSA形式的机器码能够轻松地应用许多优化算法。对于一些优化技术的算法，如机器码无用代码消除和机器码公共子表达式消除，几乎和LLVM IR的一样。但不同的是，对机器码的优化有另外的约束检查。

本章会展示一个LLVM代码库已经实现的机器码优化技术——机器码CSE（Common Subexpression Elimination——公共子表达式消除）——来让你了解机器码优化算法如何实现。

# 消除机器码公共子表达式

**CSE**算法<sup>[1]</sup>的目的是消除公共子表达式的计算，删除冗余代码以减少计算时间，并使得代码更加紧凑。让我们看看LLVM代码库的代码来弄明白它是如何实现的，详细代码位于lib/CodeGen/MachineCSE.cpp文件。

## 详细步骤

1. MachineCSE类作用于机器码函数，所以它继承了MachineFunctionPass类。它有多个成员，例如TargetInstructionInfo用于获取目标平台指令信息（用于执行CSE）；TargetRegisterInfo用于获取目标平台寄存器信息（例如它是否属于保留寄存器类，或者类似的类）；MachineDominatorTree用于获取机器码区块支配者树的信息。

```
class MachineCSE : public MachineFunctionPass {
    const TargetInstrInfo *TII;
    const TargetRegisterInfo *TRI;
    AliasAnalysis *AA;
    MachineDominatorTree *DT;
    MachineRegisterInfo *MRI;
```

2. 这个类的构造函数初始化Pass，定义如下：

```
public:
    static char ID; // Pass ID
    MachineCSE() : MachineFunctionPass(ID),
    LookAheadLimit(5), CurrVN(0) {
        initializeMachineCSEPass(*PassRegistry::getPassRegistry());
    }
```

3. getAnalysisUsage()函数确定了在此Pass运行之前运行的Pass，通过这些Pass可以获得一些当前Pass需要的统计数据：

```

void getAnalysisUsage(AnalysisUsage &AU) const override {
    AU.setPreservesCFG();
    MachineFunctionPass::getAnalysisUsage(AU);
    AU.addRequired<AliasAnalysis>();
    AU.addPreservedID(MachineLoopInfoID);
    AU.addRequired<MachineDominatorTree>();
    AU.addPreserved<MachineDominatorTree>();
}

```

4. 在Pass中声明一些辅助函数，来检查简单的复写传播、无用定义、物理寄存器生存状态，及其定义使用：

```

private:
.....
.....
bool PerformTrivialCopyPropagation(MachineInstr *MI,
                                    MachineBasicBlock *MBB);
bool isPhysDefTriviallyDead(unsigned Reg,
                           MachineBasicBlock::const_iterator I,
                           MachineBasicBlock::const_iterator E) const;
bool hasLivePhysRegDefUses(const MachineInstr *MI,
                           const MachineBasicBlock *MBB,
                           SmallSet<unsigned, 8> &PhysRefs,
                           SmallVectorImpl<unsigned> &PhysDefs,
                           bool &PhysUseDef) const;
bool PhysRegDefsReach(MachineInstr *CSMI, MachineInstr *MI,
                      SmallSet<unsigned, 8> &PhysRefs,
                      SmallVectorImpl<unsigned> &PhysDefs,
                      bool &NonLocal) const;

```

5. 还有一些辅助函数，用于确定对表达式执行CSE的合法性和收益性：

```

bool isCSECandidate(MachineInstr *MI);
bool isProfitableToCSE(unsigned CSReg, unsigned Reg,
                       MachineInstr *CSMI, MachineInstr *MI);

Actual CSE performing function
bool PerformCSE(MachineDomTreeNode *Node);

```

我们来看看CSE函数是如何实现的：

1. Pass运行之后首先调用runOnMachineFunction()函数：

```
bool MachineCSE::runOnMachineFunction(MachineFunction &MF){  
    if (skipOptNoneFunction(*MF.getFunction()))  
        return false;  
  
    TII = MF.getSubtarget().getInstrInfo();  
    TRI = MF.getSubtarget().getRegisterInfo();  
    MRI = &MF.getRegInfo();  
    AA = &getAnalysis<AliasAnalysis>();  
    DT = &getAnalysis<MachineDominatorTree>();  
    return PerformCSE(DT->getRootNode());  
}
```

2. 然后调用PerformCSE()函数，它以DomTree的根节点为起点，对DomTree执行DFS遍历，以DomTree的节点构建工作列表。完成对DomTree的DFS遍历之后，处理与工作列表中每个节点相对应的MachineBasicBlock类：

```
bool MachineCSE::PerformCSE(MachineDomTreeNode *Node) {  
    SmallVector<MachineDomTreeNode*, 32> Scopes;  
    SmallVector<MachineDomTreeNode*, 8> WorkList;  
    DenseMap<MachineDomTreeNode*, unsigned> OpenChildren;  
  
    CurrVN = 0;  
    // DFS 构建worklist  
    WorkList.push_back(Node);  
    do {  
        Node = WorkList.pop_back_val();  
        Scopes.push_back(Node);  
        const std::vector<MachineDomTreeNode*> &Children =  
Node->getChildren();  
        unsigned NumChildren = Children.size();  
        OpenChildren[Node] = NumChildren;  
        for (unsigned i = 0; i != NumChildren; ++i) {  
            MachineDomTreeNode *Child = Children[i];  
            WorkList.push_back(Child);  
        }  
    } while (!WorkList.empty());  
  
    // 执行CSE
```

```

bool Changed = false;
for (unsigned i = 0, e = Scopes.size(); i != e; ++i) {
    MachineDomTreeNode *Node = Scopes[i];
    MachineBasicBlock *MBB = Node->getBlock();
    EnterScope(MBB);
    Changed |= ProcessBlock(MBB);
    ExitScopeIfDone(Node, OpenChildren);
}
return Changed;
}

```

3. 下一个重要的函数是ProcessBlock()函数，作用于机器码的基本块。它遍历MachineBasicBlock类的指令并检查CSE的合法性和收益性，确定是否执行CSE：

```

bool MachineCSE::ProcessBlock(MachineBasicBlock *MBB) {
    bool Changed = false;

    SmallVector<std::pair<unsigned, unsigned>, 8> CSEPairs;
    SmallVector<unsigned, 2> ImplicitDefsToUpdate;

    // 遍历每一个MachineBasicBlock中的机器码指令
    for (MachineBasicBlock::iterator I = MBB->begin(), E =
        MBB->end(); I != E; ) {
        MachineInstr *MI = &*I;
        ++I;
        // 检查是否适合进行CSE
        if (!isCSECandidate(MI))
            continue;

        bool FoundCSE = VNT.count(MI);
        if (!FoundCSE) {
            // 尝试不重要的复写传播来寻找更多的CSE机会
            if (PerformTrivialCopyPropagation(MI, MBB)) {
                Changed = true;

                // 在合并MI之后，它本身可能成为一个复写
                if (MI->isCopyLike())
                    continue;

                // 再次尝试CSE
                FoundCSE = VNT.count(MI);
            }
        }
    }
}

```

```

bool Commuted = false;
if (!FoundCSE && MI->isCommutable()) {
    MachineInstr *NewMI = TII->commuteInstruction(MI);
    if (NewMI) {
        Commuted = true;
        FoundCSE = VNT.count(NewMI);
        if (NewMI != MI) {
            // 新的指令, 不需要保存
            NewMI->eraseFromParent();
            Changed = true;
        } else if (!FoundCSE)
            // MI改变了, 但需要重新计算
            (void)TII->commuteInstruction(MI);
    }
}

// 如果这条指令定义了物理寄存器, 那么值可能被使用, 用公共子表达式替换它就是
// 不安全的。
// 如果指令使用了物理寄存器, 那么也是不安全的。
bool CrossMBBPhysDef = false;
SmallSet<unsigned, 8> PhysRefs;
SmallVector<unsigned, 2> PhysDefs;
bool PhysUseDef = false;

// 检查这条指令是否有CSE的标记。检查它是否使用了物理寄存器, 如果是就取消CSE
// 标记
if (FoundCSE && hasLivePhysRegDefUses(MI, MBB, PhysRefs,
                                         PhysDefs,
                                         PhysUseDef)) {
    FoundCSE = false;
...
...
}

if (!FoundCSE) {
    VNT.insert(MI, CurrVN++);
    Exps.push_back(MI);
    continue;
}

// 判断是否存在公共子表达式, 完成决定的工作。
// 找到一个公共子表达式, 消除它。
unsigned CSVN = VNT.lookup(MI);
MachineInstr *CSMI = Exps[CSVN];
DEBUG(dbgs() << "Examining: " << *MI);
DEBUG(dbgs() << "**** Found a common subexpression: " <<
*CSMI);

```

```

// 检查这个CSE的收益性
bool DoCSE = true;
unsigned NumDefs = MI->getDesc().getNumDefs() +
                  MI->getDesc().getNumImplicitDefs();

for (unsigned i = 0, e = MI->getNumOperands(); NumDefs
&& i != e; ++i) {
    MachineOperand &MO = MI->getOperand(i);
    if (!MO.isReg() || !MO.isDef())
        continue;
    unsigned OldReg = MO.getReg();
    unsigned NewReg = CSMI->getOperand(i).getReg();

    // 如果MI中的定义有用，为了保证它在CSMI中也有用，遍历隐式CSMI和MI的定义
    if (MO.isImplicit() && !MO.isDead() && CSMI->getOperand(i).isDead())
        ImplicitDefsToUpdate.push_back(i);
    if (OldReg == NewReg) {
        --NumDefs;
        continue;
    }

    assert(TargetRegisterInfo::isVirtualRegister(OldReg)
&&
           TargetRegisterInfo::isVirtualRegister(NewReg)
&&
           "Do not CSE physical register defs!");

    if (!isProfitableToCSE(NewReg, OldReg, CSMI, MI)) {
        DEBUG(dbgs() << "*** Not profitable, avoid
CSE!\n");
        DoCSE = false;
        break;
    }

    // 如果旧的指令不能存在于新的指令的寄存器类中，不执行CSE
    const TargetRegisterClass *OldRC = MRI->getRegClass(OldReg);
    if (!MRI->constrainRegClass(NewReg, OldRC)) {
        DEBUG(dbgs() << "*** Not the same register class,
avoid CSE!\n");
        DoCSE = false;
        break;
    }
    CSEPairs.push_back(std::make_pair(OldReg, NewReg));
    --NumDefs;
}

```

```

// 实际执行消除
if (DocSE) {
    for (unsigned i = 0, e = CSEPairs.size(); i != e;
++i) {
        MRI->replaceRegWith(CSEPairs[i].first, CSEPairs[i].
second);
        MRI->clearKillFlags(CSEPairs[i].second);
    }
}

// 如果MI中的定义有用，为了保证它在CSMI中也有用，遍历隐式CSMI和MI的定
义
for (unsigned i = 0, e = ImplicitDefsToUpdate.size();
i != e; ++i)
    CSMI->getOperand(ImplicitDefsToUpdate[i]).
setIsDead(false);

if (CrossMBBPhysDef) {
    // 向MBB Livein表增加物理寄存器定义
    while (!PhysDefs.empty()) {
        unsigned LiveIn = PhysDefs.pop_back_val();
        if (!MBB->isLiveIn(LiveIn))
            MBB->addLiveIn(LiveIn);
    }
    ++NumCrossBBCSEs;
}
MI->eraseFromParent();
++NumCSEs;
if (!PhysRefs.empty())
    ++NumPhysCSEs;
if (Commutated)
    ++NumCommutes;
Changed = true;
} else {
    VNT.insert(MI, CurrVN++);
    Exps.push_back(MI);
}
CSEPairs.clear();
ImplicitDefsToUpdate.clear();
}

return Changed;
}

```

4. 我们来仔细看一下判断合法性和收益性以决定CSE的函数：

```

bool MachineCSE::isCSECandidate(MachineInstr *MI) {
// 如果机器指令是PHI，或者内联汇编，或者隐式定义，不进行CSE

    if (MI->isPosition() || MI->isPHI() || MI-
>isImplicitDef() || MI->isKill() ||
        MI->isInlineAsm() || MI->isDebugValue())
        return false;

    // 忽略复制
    if (MI->isCopyLike())
        return false;

    // 忽略我们显然不能移动的指令
    if (MI->mayStore() || MI->isCall() || MI->isTerminator()
|| MI->hasUnmodeledSideEffects())
        return false;

    if (MI->mayLoad()) {
        // 好的，这个指令执行了一次加载。为了更精确一点，我们让目标平台决定这个
被加载的
        // 值是否为一个常量。如果是，我们就将它作为一次加载使用。
        if (!MI->isInvariantLoad(AA))
            return false;
    }
    return true;
}

```

5. 收益性函数代码如下：

```

bool MachineCSE::isProfitableToCSE(unsigned CSReg, unsigned
Reg,
    MachineInstr *CSMI, MachineInstr *MI) {

    // 如果CSReg被所有的寄存器使用，不应该执行CSE，否则会增加CSReg的寄存器
压力
    bool MayIncreasePressure = true;
    if (TargetRegisterInfo::isVirtualRegister(CSReg) &&
        TargetRegisterInfo::isVirtualRegister(Reg)) {
        MayIncreasePressure = false;
        SmallPtrSet<MachineInstr*, 8> CSUses;
                    for (MachineInstr     &MI      :      MRI-
>use_nodbg_instructions(CSReg)) {
                        CSUses.insert(&MI);
                    }
                    for (MachineInstr &MI : MRI-
>use_nodbg_instructions(Reg))

```

```

{
    if (!CSUses.count(&MI)) {
        MayIncreasePressure = true;
        break;
    }
}
if (!MayIncreasePressure) return true;

// 启发规则 #1: 如果定义不在本地, 也不在紧邻的前驱, 并且计算量很小, 那么
// 不进行CSE。
// 否则会增加寄存器压力, 甚至导致其他计算的溢出。
if (TII->isAsCheapAsAMove(MI)) {
    MachineBasicBlock *CSBB = CSMI->getParent();
    MachineBasicBlock *BB = MI->getParent();
    if (CSBB != BB && !CSBB->isSuccessor(BB))
        return false;
}

// 启发规则 #2: 如果表达式不使用虚拟寄存器, 并且唯一的冗余计算是复制, 不进
// 行CSE。
bool HasVRegUse = false;
for (unsigned i = 0, e = MI->getNumOperands(); i != e;
++i) {
    const MachineOperand &MO = MI->getOperand(i);
    if (MO.isReg() && MO.isUse() &&
        TargetRegisterInfo::isVirtualRegister(MO.getReg()))
{
    HasVRegUse = true;
    break;
}
}
if (!HasVRegUse) {
    bool HasNonCopyUse = false;
    for (MachineInstr &MI : MRI-
>use_nodbg_instructions(Reg)) {
        // 忽略复制
        if (!MI.isCopyLike()) {
            HasNonCopyUse = true;
            break;
        }
    }
    if (!HasNonCopyUse)
        return false;
}

// 启发规则 #3: 如果公共子表达式被PHI使用, 那么除非该定义在新使用的BB中
// 已使用,

```

```
// 否则不再使用它
bool HasPHI = false;
SmallPtrSet<MachineBasicBlock*, 4> CSBBs;
for (MachineInstr &MI : MRI->use_nodbg_instructions(CSReg)) {
    HasPHI |= MI.isPHI();
    CSBBs.insert(MI.getParent());
}

if (!HasPHI)
    return true;
return CSBBs.count(MI->getParent());
}
```

## 工作原理

MachineCSEPass作用于机器码函数。它获取DomTree的信息，会以深度优先搜索的方式遍历DomTree，以MachineBasicBlock为节点创建工作列表；然后对其中的每一个区块进行CSE。在每一个区块中，它遍历所有的指令，检查是否能够进行CSE。然后会检查消除冗余表达式的收益性。一旦证明进行CSE消除具有收益性，它会把对应的MachineInstruction类从MachineBasicBlock类消除，同时也会进行一个简单的机器指令的复写传播。有些时候，MachineInstruction可能没办法在初始步骤进行CSE，但在一次复写传播之后就能够进行CSE了。

## 另请参阅

关于SSA形式的机器码优化，例如机器码无用代码消除Pass的实现，请参见lib/CodeGen/DeadMachineInstructionElim.cpp文件。

# 活动周期分析

本节介绍寄存器分配。在此之前，你必须了解什么是活动变量和活动周期。活动周期，指的是一个变量的活动范围，即变量的第一次定义到最后一次使用的范围。为此，我们需要计算一条指令之后不再使用的寄存器集合，即变量的最后一次使用，以及一条指令使用但接下来的指令不使用的寄存器集合。我们计算函数中每个虚拟寄存器和每个物理寄存器的活动变量信息。SSA能够大致计算虚拟寄存器的活动信息，我们只需记录区块中物理寄存器的信息。在寄存器分配之前，LLVM假定物理寄存器只存在于一个单一的基本块之内，这种假定使得只需要对每一个基本块进行一次局部分析就能计算物理寄存器的生命周期。在执行活动变量分析之后，我们便有了执行活动周期分析和构建活动周期所必需的信息。为此我们首先为基本块和机器指令标号，在处理共享寄存器的变量之后，通常会处理寄存器中的参数。虚拟寄存器的活动周期按照机器指令的顺序计算(1,N)。活动周期(i,j)指的是一个变量的活动范围，并且 $1 \leq i \leq j < N$ 。

本节通过一个样例程序来展示如何列举程序中的活动周期，以及 LLVM如何来计算这些活动周期。

## 准备工作

开始之前，我们需要一段用于活动周期分析的测试代码，为了简单起见，我们使用C语言代码，然后转为LLVM IR。

1. 首先编写一段包含if-else区块的测试程序：

```
$ cat interval.c
void donothing(int a) {
    return;
}

int func(int i) {
    int a = 5;
```

```

donothing(a);
int m = a;
donothing(m);
a = 9;
if (i < 5) {
    int b = 3;
    donothing(b);
    int z = b;
    donothing(z);
}
else {
    int k = a;
    donothing(k);
}

return m;
}

```

2. 使用Clang把C语言代码转为IR，用cat命令查看生成的IR:

```

$ clang -cc1 -emit-llvm interval.c

$ cat interval.ll
; ModuleID = 'interval.c'
target datalayout = "e-m:e-i64:64-f80:128-n8:16:32:64-S128"
target triple = "x86_64-unknown-linux-gnu"

; Function Attrs: nounwind
define void @donothing(i32 %a) #0 {
    %1 = alloca i32, align 4
    store i32 %a, i32* %1, align 4
    ret void
}

; Function Attrs: nounwind
define i32 @func(i32 %i) #0 {
    %1 = alloca i32, align 4
    %a = alloca i32, align 4
    %m = alloca i32, align 4
    %b = alloca i32, align 4
    %z = alloca i32, align 4
    %k = alloca i32, align 4
    store i32 %i, i32* %1, align 4
    store i32 5, i32* %a, align 4
    %2 = load i32, i32* %a, align 4
    call void @donothing(i32 %2)
}
```

```

%3 = load i32, i32* %a, align 4
store i32 %3, i32* %m, align 4
%4 = load i32, i32* %m, align 4
call void @donothing(i32 %4)
store i32 9, i32* %a, align 4
%5 = load i32, i32* %1, align 4
%6 = icmp slt i32 %5, 5
br i1 %6, label %7, label %11

; <label>:7      ; preds = %0
store i32 3, i32* %b, align 4
%8 = load i32, i32* %b, align 4
call void @donothing(i32 %8)
%9 = load i32, i32* %b, align 4
store i32 %9, i32* %z, align 4
%10 = load i32, i32* %z, align 4
call void @donothing(i32 %10)
br label %14

; <label>:11      ; preds = %0
%12 = load i32, i32* %a, align 4
store i32 %12, i32* %k, align 4
%13 = load i32, i32* %k, align 4
call void @donothing(i32 %13)
br label %14

; <label>:14      ; preds = %11, %7
%15 = load i32, i32* %m, align 4
ret i32 %15
}

attributes #0 = { nounwind "less-precise-fpmad"="false"
"no-frame-pointer-elim"="false" "no-infs-fp-math"="false"
"no-nans-fp-math"="false" "no-realign-stack" "stack-
protector-buffer-size"="8" "unsafe-fp-math"="false" "use-
soft-float"="false" }

!llvm.ident = !{!0}

!0 = !{"clang version 3.7.0 (trunk 234045)"}

```

## 详细步骤

1. 为了列出活动周期，我们需要为LiveIntervalAnalysis.cpp文件增加一段代码来输出活动周期。我们增加以下内容（增加的代码用+号标记）：

```
void LiveIntervals::computeVirtRegInterval(LiveInterval &LI) {
    assert(LRCalc && "LRCalc not initialized.");
    assert(LI.empty() && "Should only compute empty
intervals.");
    LRCalc->reset(MF, getSlotIndexes(), DomTree,
&getVNInfoAllocator());
    LRCalc->calculate(LI, MRI->shouldTrackSubRegLiveness(LI.reg));
    computeDeadValues(LI, nullptr);

/* ***** 增加以下代码 *****/
+ llvm::outs() << "***** INTERVALS *****\n";

    // 输出 regunits
    + for (unsigned i = 0, e = RegUnitRanges.size(); i != e;
++i)
        + if (LiveRange *LR = RegUnitRanges[i])
            + llvm::outs() << PrintRegUnit(i, TRI) << ' ' << *LR
<< '\n';

    // 输出虚拟寄存器
    + llvm::outs() << "virtregs:";
    + for (unsigned i = 0, e = MRI->getNumVirtRegs(); i != e;
++i) {
        + unsigned Reg = TargetRegisterInfo::index2VirtReg(i);
        + if (hasInterval(Reg))
            + llvm::outs() << getInterval(Reg) << '\n';
    + }
```

2. 在修改之前的源码文件之后重新构建LLVM，并在路径下安装。

3. 使用llc命令编译IR格式的测试代码，会得到以下的活动周期：

```
$ llc interval.ll
***** INTERVALS *****
virtregs:%vreg0 [16r,32r:0] 0@16r
***** INTERVALS *****
virtregs:%vreg0 [16r,32r:0] 0@16r
***** INTERVALS *****
virtregs:%vreg0 [16r,32r:0] 0@16r
```

```

%vreg1 [80r,96r:0) 0@80r
***** INTERVALS *****
virtregs:%vreg0 [16r,32r:0) 0@16r
%vreg1 [80r,96r:0) 0@80r
%vreg2 [144r,192r:0) 0@144r
***** INTERVALS *****
virtregs:%vreg0 [16r,32r:0) 0@16r
%vreg1 [80r,96r:0) 0@80r
%vreg2 [144r,192r:0) 0@144r
%vreg5 [544r,592r:0) 0@544r
***** INTERVALS *****
virtregs:%vreg0 [16r,32r:0) 0@16r
%vreg1 [80r,96r:0) 0@80r
%vreg2 [144r,192r:0) 0@144r
%vreg5 [544r,592r:0) 0@544r
%vreg6 [352r,368r:0) 0@352r
***** INTERVALS *****
virtregs:%vreg0 [16r,32r:0) 0@16r
%vreg1 [80r,96r:0) 0@80r
%vreg2 [144r,192r:0) 0@144r
%vreg5 [544r,592r:0) 0@544r
%vreg6 [352r,368r:0) 0@352r
%vreg7 [416r,464r:0) 0@416r
***** INTERVALS *****
virtregs:%vreg0 [16r,32r:0) 0@16r
%vreg1 [80r,96r:0) 0@80r
%vreg2 [144r,192r:0) 0@144r
%vreg5 [544r,592r:0) 0@544r
%vreg6 [352r,368r:0) 0@352r
%vreg7 [416r,464r:0) 0@416r
%vreg8 [656r,672r:0) 0@656r

```

## 工作原理

前面的例子中展示了活动周期是如何与每一个虚拟寄存器关联起来的。活动周期的开始和结束用括号标记。活动周期的计算是从 LiveVariables::runOnMachineFunction (MachineFunction &mf) 函数开始，它位于 lib/CodeGen/LiveVariables.cpp 文件，它通过 HandleVirtRegUse 和 HandleVirtRegDef 函数来计算寄存器的定义和使用，之后通过 getVarInfo 函数得到给定虚拟寄存器的 VarInfo 对象。

LiveInterval 和 LiveRange 类定义于 LiveInterval.cpp 中。通过它们可以

获得变量活动周期的信息，以便检查活动周期是否重叠。

在LiveIntervalAnalysis.cpp文件中，实现了活动周期分析的Pass，它以DFS的顺序扫描基本块（以线性方式组织），为每个虚拟寄存器和物理寄存器创建活动周期。之后这些分析会被寄存器分配器使用，第8章的章节会讨论这个问题。

## 另请参阅

- 如果你想知道不同基本块的虚拟寄存器是如何产生的，或者想看看这些虚拟寄存器的生命周期，你可以使用`-debug-only=regalloc`命令行参数运行llc工具来编译测试实例。当然，你需要debug版本的LLVM。
- 关于活动周期的更多信息，请参见以下这些代码文件。
  - lib/CodeGen/LiveInterval.cpp
  - lib/CodeGen/LiveIntervalAnalysis.cpp
  - lib/CodeGen/LiveVariables.cpp。

# 寄存器分配

寄存器分配的任务是把物理寄存器分配给虚拟寄存器。虚拟寄存器是无限的，而一台机器的物理寄存器是有限的。因此，寄存器分配旨在最大化分配给虚拟寄存器的物理寄存器数量。

本节介绍在LLVM中寄存器如何表示，更改寄存器信息的详细步骤，以及内建的寄存器分配器。

## 准备工作

你需要构建并安装LLVM。

## 详细步骤

1. build-folder/lib/Target/X86/X86GenRegisterInfo.inc文件的前几行展示了在LLVM中寄存器如何表示，可以看到，寄存器用整数来表示：

```
namespace X86 {  
enum {  
    NoRegister,  
    AH = 1,  
    AL = 2,  
    AX = 3,  
    BH = 4,  
    BL = 5,  
    BP = 6,  
    BPL = 7,  
    BX = 8,  
    CH = 9,  
    ...  
}
```

2. 对于具有共享相同物理位置的寄存器的架构来说，可以查看这个

架构的RegisterInfo.td文件来了解这些别名信息。让我们来检查lib/Target/X86/X86RegisterInfo.td文件。下面的代码片段展示了EAX、AX、AL让寄存器其实是互为别名（共享）的（我们只提及了最小的寄存器别名）：

```
def AL : X86Reg<"al", 0>;
def DL : X86Reg<"dl", 2>;
def CL : X86Reg<"cl", 1>;
def BL : X86Reg<"bl", 3>;

def AH : X86Reg<"ah", 4>;
def DH : X86Reg<"dh", 6>;
def CH : X86Reg<"ch", 5>;
def BH : X86Reg<"bh", 7>;

def AX : X86Reg\<"ax", 0, \[AL,AH]>;
def DX : X86Reg\<"dx", 2, \[DL,DH]>;
def CX : X86Reg\<"cx", 1, \[CL,CH]>;
def BX : X86Reg\<"bx", 3, \[BL,BH]>;

// 32位寄存器
let SubRegIndices = [sub_16bit] in {
def EAX : X86Reg<"eax", 0, [AX]>, DwarfRegNum<[-2, 0, 0]>;
def EDX : X86Reg<"edx", 2, [DX]>, DwarfRegNum<[-2, 2, 2]>;
def ECX : X86Reg<"ecx", 1, [CX]>, DwarfRegNum<[-2, 1, 1]>;
def EBX : X86Reg<"ebx", 3, [BX]>, DwarfRegNum<[-2, 3, 3]>;
def ESI : X86Reg<"esi", 6, [SI]>, DwarfRegNum<[-2, 6, 6]>;
def EDI : X86Reg<"edi", 7, [DI]>, DwarfRegNum<[-2, 7, 7]>;
def EBP : X86Reg<"ebp", 5, [BP]>, DwarfRegNum<[-2, 4, 5]>;
def ESP : X86Reg<"esp", 4, [SP]>, DwarfRegNum<[-2, 5, 4]>;
def EIP : X86Reg<"eip", 0, [IP]>, DwarfRegNum<[-2, 8, 8]>;
...
}
```

3. 为了改变可用物理寄存器的数量，可以在TargetRegisterInfo.td文件中把一些寄存器注释掉，这是RegisterClass最后的参数。打开X86RegisterInfo.cpp文件把AH、CH、DH寄存器删掉：

```
def GR8 : RegisterClass<"X86", [i8], 8,
    (add AL, CL, DL, AH, CH, DH, BL,
    BH, SIL, DIL, BPL, SPL,
    R8B, R9B, R10B, R11B, R14B,
    R15B, R12B, R13B) {
```

4. 在构建LLVM的时候，.inc文件会首先被改变，它们将不再包含AH、CH、DH寄存器。

5. 在“活动周期分析”一节中我们执行了活动周期分析，现在我们使用那一节的测试代码，运行LLVM提供的不同的寄存器分配技术（fast、basic、greedy、pbqp），在这里我们运行其中的两个并比较其结果：

```
$ llc -regalloc=basic interval.ll -o intervalregbasic.s
```

然后创建intervalregbasic.s文件：

```
$ cat intervalregbasic.s
.text
.file
"interval.ll"
.globl donothing
.align 16, 0x90
.type  donothing,@function
donothing:           # @donothing
# BB#0:
    movl %edi, -4(%rsp)
    retq
.Lfunc_end0:
.size  donothing, .Lfunc_end0-donothing

.globl func
.align 16, 0x90
.type  func,@function
func:                # @func
# BB#0:
    subq $24, %rsp
    movl %edi, 20(%rsp)
    movl $5, 16(%rsp)
    movl $5, %edi
    callq donothing
    movl 16(%rsp), %edi
    movl %edi, 12(%rsp)
    callq donothing
    movl $9, 16(%rsp)
    cmpl $4, 20(%rsp)
    jg .LBB1_2
# BB#1:
```

```

    movl $3, 8(%rsp)
    movl $3, %edi
    callq donothing
    movl 8(%rsp), %edi
    movl %edi, 4(%rsp)
    jmp .LBB1_3
.LBB1_2:
    movl 16(%rsp), %edi
    movl %edi, (%rsp)
.LBB1_3:
    callq donothing
    movl 12(%rsp), %eax
    addq $24, %rsp
    retq
.Lfunc_end1:
.size func, .Lfunc_end1-func

```

运行以下命令，比较两个文件：

```
$ llc -regalloc=pbqp interval.ll -o intervalregpbqp.s
```

得到intervalregpbqp.s文件：

```

$cat intervalregpbqp.s
.text
.file "interval.ll"
.globl donothing
.align 16, 0x90
.type donothing, @function
donothing          #@donothing
# BB#0:
    movl %edik %eax
    movl %eax, -1(%rsp)
    retq
.Lfunc_end0:
.size donothing, .Lfunc_end0-donothing

.globl func
.align 16, 0x90
.type func, @function
Func:           #@func
# BB#0:
    subq $23, %rsp
    movl %edi, %eax
    movl %eax, 20(%rsp)

```

```

movl %5, 16(%rsp)
movl %5, %edi
callq donothing
movl 16(%rsp), %eax
movl %eax, 12(%rsp)
movl %eax, %edi
callq donothing
movl $9, 16(%rsp)
cmpl $4, 20(%rsp)
jg .LBB1_2
# BB#1:
movl $3, 8(%rsp)
movl $3, %edi
callq donothing
movl 8(%rsp), %eax
movl %eax, 4(%rsp)
jmp .LBB1_3
.LBB1_2:
    movl 16(%rsp), %eax
    movl %eax, (%rsp)
.LBB1_3:
    movl %eax, %edi
    callq donothing
    movl 12(%rsp), %eax
    addq $24, %rsp
    retq
.Lfunc_end1:
.size func, .Lfunc_end1-func

```

6. 现在，用diff工具并排比较两个汇编码。

## 工作原理

从虚拟寄存器到物理寄存器的映射有两种方式。

- 直接映射：使用TargetRegisterInfo和MachineOperand类。在这种方式下，开发者需要提供加载和存储指令的插入位置，以获得和存储内存中的值。
- 间接映射：使用VirtRegMap类来插入加载和存储指令，以获得和存储内存中的值。使用VirtRegMap::assignVirt2Phys(vreg, preg)函数来

实现从虚拟寄存器到物理寄存器的映射。

寄存器分配器扮演的另一个重要角色就是SSA的析构。由于传统的机器指令集不支持phi指令，所以常常会用其他指令来替换它以生成机器码。传统的方式是用copy指令来替换phi指令。

在这一阶段之后才真正实施物理寄存器映射。LLVM中有4种寄存器分配的实现，分别有4种将虚拟寄存器映射到物理寄存器的算法。在这里不再赘述算法的细节，如果对此有兴趣，可以参见下一节。

## 另请参阅

- 关于LLVM中的更多算法，请参见lib/CodeGen/目录中的源码：
- - Lib/CodeGen/RegAllocBasic.cpp
  - Lib/CodeGen/RegAllocFast.cpp
  - Lib/CodeGen/RegAllocGreedy.cpp
  - Lib/CodeGen/RegAllocPBQP.cpp

# 插入头尾代码

插入头尾（prologue-epilogue）代码包括栈展开、完成函数布局、保存被调用者保存（callee-saved）寄存器、发射头尾代码。除此之外，它也会把抽象栈帧索引替换为适当的引用。这个Pass在寄存器分配阶段之后运行。

## 详细步骤

基本框架和重要函数定义于PrologueEpilogueInserter类，如下：

- 头尾代码插入器Pass作用于机器函数，因此它继承了MachineFunctionPass类，它的构造函数初始化这个Pass：

```
class PEI : public MachineFunctionPass {  
public:  
    static char ID;  
    PEI() : MachineFunctionPass(ID) {  
        initializePEIPass(*PassRegistry::getPassRegistry());  
    }  
}
```

- 类中定义了多个辅助函数，用于插入头尾代码：

```
void calculateSets(MachineFunction &Fn);  
void calculateCallsInformation(MachineFunction &Fn);  
void calculateCalleeSavedRegisters(MachineFunction &Fn);  
void insertCSRSpillsAndRestores(MachineFunction &Fn);  
void calculateFrameObjectOffsets(MachineFunction &Fn);  
void replaceFrameIndices(MachineFunction &Fn);  
void replaceFrameIndices(MachineBasicBlock *BB,  
MachineFunction &Fn,  
                           int &SPAdj);  
void scavengeFrameVirtualRegs(MachineFunction &Fn);
```

- 插入头尾代码的主函数，insertPrologEpilogCode():

```
void insertPrologEpilogCode(MachineFunction &Fn);
```

- 这个Pass首先执行runOnFunction()函数，代码中的注释说明了它执行的多个操作：计算调用栈大小、调整栈上变量、为调用者保存寄存器插入溢出（spill）代码、计算实际栈帧偏移、为函数插入头尾代码、用实际栈帧偏移替换抽象栈帧索引等：

```
bool PEI::runOnMachineFunction(MachineFunction &Fn) {
    const Function* F = Fn.getFunction();
    const TargetRegisterInfo *TRI = Fn.getSubtarget().
    getRegisterInfo();
    const TargetFrameLowering *TFI = Fn.getSubtarget().
    getFrameLowering();

    assert(!Fn.getRegInfo().getNumVirtRegs() && "Regalloc
must assign all vregs");

    RS = TRI->requiresRegisterScavenging(Fn) ? new
    RegScavenger() : nullptr;
    FrameIndexVirtualScavenging = TRI-
    >requiresFrameIndexScavenging(
    Fn);

    // 为函数的帧信息计算MaxCallFrameSize和AdjustsStack变量，消除伪调用代
    // 码
    calculateCallsInformation(Fn);

    // 允许目标平台对函数做一些调整，例如在calculateCalleeSavedRegisters
    // 之前调
    // 用UsedPhysRegs
    TFI->processFunctionBeforeCalleeSavedScan(Fn, RS);
    // 扫描函数，以修改调用者保存寄存器，插入溢出代码
    calculateCalleeSavedRegisters(Fn);

    // 确定CSR溢出/恢复代码的位置，溢出代码放在入口块，恢复代码放在返回块。
    calculateSets(Fn);

    // 增加保存/恢复调用者保存寄存器的相关代码
    if (!F->hasFnAttribute(Attribute::Naked))
        insertCSRSpillsAndRestores(Fn);
```

```

// 在栈帧确定之前，允许目标平台对函数做最后修改
TFI->processFunctionBeforeFrameFinalized(Fn, RS);

//为所有抽象栈对象计算真实的栈帧偏移
calculateFrameObjectOffsets(Fn);

//为函数插入头尾代码。此函数用于为任意堆栈变量或已调用函数调整所需栈帧。因此，在
//这个函数之前需要调用calculateCalleeSavedRegisters()函数以设置
//AdjustsStack和MaxCallFrameSize变量
if (!F->hasFnAttribute(Attribute::Naked))
insertPrologEpilogCode(Fn);

// 用物理寄存器引用和真实的偏移来替换所有的MO_FrameIndex操作数
replaceFrameIndices(Fn);

// 如果需要寄存器清扫（scavenge），我们会通过post-pass来打扫已插入的帧索引消除
//虚拟寄存器
if (TRI->requiresRegisterScavenging(Fn) &&
FrameIndexVirtualScavenging)
    scavengeFrameVirtualRegs(Fn);

// 清理虚拟清扫产生的任意虚拟寄存器
Fn.getRegInfo().clearVirtRegs();

// 超出栈大小限制时给出警告
MachineFrameInfo *MFI = Fn.getFrameInfo();
uint64_t StackSize = MFI->getStackSize();
if (WarnStackSize.getNumOccurrences() > 0 &&
WarnStackSize < StackSize) {
    DiagnosticInfoStackSize DiagStackSize(*F, StackSize);
    F->getContext().diagnose(DiagStackSize);
}
delete RS;
ReturnBlocks.clear();
return true;
}

```

- 插入头尾代码的主函数是insertPrologEpilogCode()函数。它首先利用TargetFrameLowering对象，根据相应的平台为函数插入头代码。对于函数的每个基本块，检查是否有返回语句，若是则插入尾代码。

```

void PEI::insertPrologEpilogCode(MachineFunction &Fn) {
    const TargetFrameLowering &TFI = *Fn.getSubtarget().getFrameLowering();

    // 为函数插入头代码
    TFI.emitPrologue(Fn);

    // 在每个退出区块中插入尾代码保存被调者保存寄存器
    for (MachineFunction::iterator I = Fn.begin(), E =
Fn.end(); I != E; ++I) {
        // 如果最后一条指令是return, 插入尾代码
        if (!I->empty() && I->back().isReturn())
            TFI.emitEpilogue(Fn, *I);
    }

    // 如果有必要, 发射额外代码以支持分段堆栈。在这种情况下, 链接到一个支持
    // 分段堆栈
    // 的运行时 (libgcc就是其中之一), 会导致在多个小块地址分配栈空间, 而不
    // 是连续的
    // 大块内存。
    if (Fn.shouldSplitStack())
        TFI.adjustForSegmentedStacks(Fn);

    // 如果在Erlang/OTP运行时加载了HiPE的本地代码, 需要发射额外代码来显式
    // 处理栈。
    // 方法和分段堆栈相似, 但是采用了不用的条件检查, 以及另外的分配栈空间的BIF。
    if (Fn.getFunction()->getCallingConv() ==
CallingConv::HiPE)
        TFI.adjustForHiPEPrologue(Fn);
}

```

## 工作原理

前面的代码调用了TargetFrameLowering类的emitEpilogue()和emitPrologue()函数，这会在之后章节的特定平台栈帧lowering做解释。

# 代码发射

代码发射阶段把代码生成器的抽象层（例如MachineFunction、MachineInstr类）降低为机器码抽象层（例如MCInst、MCStreamer类）。这一阶段的重要类有平台无关的AsmPrinter类，特定平台的AsmPrinter子类、TargetLoweringObjectFile类。

机器码（MC）层负责发射由标签（label）、指导（directive）、指令组成的对象文件；而CodeGen层则由MachineFunctions、MachineBasicBlock、MachineInstructions组成。这一阶段的关键类是MCStreamer类，它由汇编器的API组成，由诸如EmitLabel、EmitSymbolAttribute、SwitchSection等组成，直接与上述的汇编层指导相对应。

为目标平台发射代码有4个重要的工作需要实现。

- 为目标平台定义AsmPrinter的子类。这个类需要实现主要的lowering任务，将MachineFunctions函数转为MC结构。AsmPrinter基类提供了很多可以复用的函数和例程来帮助构建特定平台的AsmPrinter类，你只需要复写一部分即可。如果你需要为你的平台实现ELF、COFF或者MachO这些格式，那也是很容易的，你可以从TargetLoweringObjectFile中复用大量的公共逻辑。
- 实现平台的指令打印机（instruction printer）。指令打印机输入MCInst类，并以文本形式输出到raw\_ostream类中。大部分打印逻辑可以在.td文件中直接定义，比如像增加 \$dst、\$src1、\$src2这样，但是你仍然需要实现打印操作数（operands）的部分。
- 你还需要将MachineInstr类转化成MCInst类。这一过程一般在<target>MCInstLower.cpp文件中实现。向底层指令转化的过程通常是平台相关的，并且需要将跳转表、常量池索引、全局变量地址等这些上层的概念统统转化成对应的MCLables。这一步也需要将一些伪指令（pseudo ops）用真正的机器指令替代。最终生成的MCInsts，就可以用来编码或打印成文本形式的汇编码。
- 如果你想直接支持.o文件的输出，或者实现自己的汇编器，你可以实现一个MCCodeEmitter的子类，它的任务是将MCInsts转化成机器码字节流（code bytes）并进行重定位（relocations）。

# 详细步骤

我们来看看lib/CodeGen/AsmPrinter/AsmPrinter.cpp文件的AsmPrinter基类的一些重要函数。

- `EmitLinkage()`: 这个函数发射给定函数和变量的链接。

```
void AsmPrinter::EmitLinkage(const GlobalValue *GV,  
MCSymbol *GVSym) const ;
```

- `EmitGlobalVariable()`: 这个函数给.s文件发射指定的全局变量。

```
void AsmPrinter::EmitGlobalVariable(const GlobalVariable *GV);
```

- `EmitFunctionHeader()`: 这个函数发射当前函数的函数头。

```
void AsmPrinter::EmitFunctionHeader();
```

- `EmitFunctionBody()`: 这个函数发射函数体。

```
void AsmPrinter::EmitFunctionBody();
```

- `EmitJumpTableInfo()`: 这个函数发射当前函数跳转表的汇编表示到当前的输出流。

```
void AsmPrinter::EmitJumpTableInfo();
```

- `EmitJumpTableEntry()`: 这个函数发射特定MachineBasicBlock类的函数跳转表条目到当前流。

```
void AsmPrinter::EmitJumpTableEntry(const  
MachineJumpTableInfo *MJTI, const MachineBasicBlock *MBB,  
unsigned UID) const;
```

- `EmitInt()`: 这个函数发射8位、16位、32位整数。

```
void AsmPrinter::EmitInt8(int Value) const {  
    OutStreamer.EmitIntValue(Value, 1);  
}  
  
void AsmPrinter::EmitInt16(int Value) const {  
    OutStreamer.EmitIntValue(Value, 2);  
}  
  
void AsmPrinter::EmitInt32(int Value) const {  
    OutStreamer.EmitIntValue(Value, 4);  
}
```

关于代码发射的具体实现，可以参见  
lib/CodeGen/AsmPrinter/AsmPrinter.cpp文件。需要注意的一件很重要的事是，这个类使用OutStreamer类的实例来输出汇编指令。而特定平台的代码发射将会在之后的章节介绍。

# 尾调用优化

本节介绍LLVM的尾调用优化。尾调用优化指的是被调函数不创建新的栈帧，而是重用主调函数的栈空间，因此减少了栈空间的使用，也减少了相互递归函数返回的开销。

## 准备工作

我们需要确保以下几点。

- 安装llc工具。
- tailcallopt选项必须可用。
- 测试代码包含尾调用。

## 详细步骤

1. 检查尾调用优化的测试代码：

```
$ cat tailcall.ll
declare fastcc i32 @tailcallee(i32 inreg %a1, i32 inreg %a2,
i32 %a3, i32 %a4)
define fastcc i32 @tailcaller(i32 %in1, i32 %in2) {
    %l1 = add i32 %in1, %in2
    %tmp = tail call fastcc i32 @tailcallee(i32 inreg %in1, i32 inr
i32 %in1, i32 %l1)
    ret i32 %tmp
}
```

2. 使用-tailcallopt选项运行llc工具，编译测试代码，产生尾调用优化过的汇编文件：

```
$ llc -tailcallopt tailcall.ll
```

3. 输出的汇编码为：

```
$ cat tailcall.s
.text
.file "tailcall.ll"
.globl tailcaller
.align 16, 0x90
.type tailcaller,@function
tailcaller:                      # @tailcaller
    .cfi_startproc
# BB#0:
    pushq %rax
.Ltmp0:
    .cfi_def_cfa_offset 16
        # kill: ESI<def> ESI<kill> RSI<def>
        # kill: EDI<def> EDI<kill> RDI<def>
    leal (%rdi,%rsi), %ecx          # kill: ESI<def> ESI<kill> RSI<kill>
    movl %edi, %edx
    popq %rax
    jmp tailcallee                 # TAILCALL
.Lfunc_end0
.size tailcaller, .Ltmp1-tailcaller
.cfi_endproc

.section ".note.GNU-stack","",@progbits
```

4. 不使用-tailcallopt选项调用llc工具编译，再次得到汇编码：

```
$ llc tailcall.ll -o tailcall1.s
```

5. 使用cat命令输出：

```
$ cat tailcall1.s
.text
.file "tailcall.ll"
.globl tailcaller
.align 16, 0x90
.type tailcaller,@function
tailcaller:                      # @tailcaller
    .cfi_startproc
```

```
# BB#0:
# kill: ESI<def> ESI<kill> RSI<def>
# kill: EDI<def> EDI<kill> RDI<def>
leal  (%rdi,%rsi), %ecx          # kill: ESI<def> ESI<kill> RSI<kill>
movl  %edi, %edx
jmp   tailcallee                 # TAILCALL
.Lfunc_end0:
.size tailcaller, .Ltmp0-tailcaller
.cfi_endproc
.section ".note.GNU-stack","",@progbits
```

使用diff工具比较两个汇编文件，这里用了meld工具，如下图所示。



# 工作原理

尾调用优化是一种编译器优化技术，目的在于减少函数调用的开销，它能够在不创建新的栈帧（不使用另外的栈空间）的情况下进行函数调用。不过这个优化有前提条件，函数调用指令必须在函数的最后，于是主调函数不再需要当前的栈帧，仅仅只要调用相应的函数（其他的函数或者它自己），然后返回被调者的返回值。尾调用优化使得尾递归函数只需要常量且有限的栈空间。为了进行优化，有时候还会改变代码本身以尝试进行尾调用优化，所以尾调用优化并不仅仅适用于特定的模式。

在之前的测试实例中，因为尾调用优化的缘故多了两条push-pop指令。在LLVM中，尾调用优化是由特定平台的ISelLowering.cpp文件实现的，对x86来说，就是X86ISelLowering.cpp文件：

```
The code in function SDValue X86TargetLowering::LowerCall (.....
bool IsMustTail = CLI.CS && CLI.CS->isMustTailCall();
if (IsMustTail) {
    // 强制转为尾调用，校验规则能够保证不改变返回地址而成功尾调用。
    isTailCall = true;
} else if (isTailCall) {
    // 检查是否是尾调用
    isTailCall = IsEligibleForTailCallOptimization(Callee,
CallConv,
                    isVarArg, SR != NotStructReturn,
                    MF.getFunction()->hasStructRetAttr(),
CLI.RetTy,
                    Outs, OutVals, Ins, DAG);
```

当传递了tailcallopt参数时上面的代码就用于调用Is Eligible ForTailCallOptimization()函数，它来决定是否进行尾调用优化，之后再由代码生成器具体实施。

# 兄弟调用优化

本节介绍LLVM兄弟调用（`sibling call`）优化。兄弟调用优化是尾调用优化的特例，当被调者和调用者函数签名相似的时候，即返回值类型和函数参数相匹配，就能进行兄弟调用优化了。

## 准备工作

为兄弟调用编写测试实例，保证调用者和被调者有相同的调用约定（`C`或者`fastcc`），并且在尾部位置是一个尾调用：

```
$ cat sibcall.ll
declare i32 @bar(i32, i32)

define i32 @foo(i32 %a, i32 %b, i32 %c) {
    entry:
        %0 = tail call i32 @bar(i32 %a, i32 %b)
        ret i32 %0
}
```

## 详细步骤

1. 用`llc`工具进行编译，生成汇编码：

```
$ llc sibcall.ll
```

2. 用`cat`命令查看生成的汇编码：

```
$ cat sibcall.s
.text
.file  "sibcall.ll"
.globl foo
```

```
.align 16, 0x90
.type foo,@function
foo:                                # @foo
    .cfi_startproc
# BB#0:                                # %entry
    Jmp bar                               # TAILCALL
.Lfunc_end0:
    .size foo, .Ltmp0-f0o
    .cfi_endproc

.section ".note.GNU-stack","",@progbits
```

## 工作原理

兄弟调用优化是尾调用优化的一个特例，它能够在尾调用上自动实施而不需要传递tailcallopt选项。兄弟调用优化和尾调用优化的方式相似，但兄弟调用优化能够自动进行并且不需要改变ABI。对于兄弟调用来说，调用者和被调者函数签名要相似，因为当主调函数（是一个尾递归函数）在被调函数完成任务后清理被调函数的参数时，如果被调用函数超出参数空间限制对一个需要更多栈空间来存储参数的函数进行兄弟调用，那么就会造成内存泄漏。

---

[1]CSE算法：CSE算法用于消除如下的冗余计算： $a = b * c + g; d = b * c + e;$ ，在这里 $b * c$ 被计算了两次，这是不必要的，它可以被优化成： $tmp = b * c; a = tmp + g; d = tmp + e;$ 。——译者注

# 第8章 实现LLVM后端

本章涵盖以下话题。

- 定义寄存器和寄存器集合
- 定义调用约定
- 定义指令集
- 实现栈帧lowering
- 打印指令
- 选择指令
- 增加指令编码
- 子平台支持
- 多指令lowering
- 平台注册

# 概述

编译器的最终目标是产生目标平台的代码，或者是产生汇编码，进而能够通过汇编器转为目标代码并能够在真实的硬件上执行。为了得到汇编码，编译器需要知道目标机器架构的各个方面——寄存器、指令集、调用约定、流水线等，所以其实在这一阶段还有很多可以做的优化。

LLVM有自己的定义目标机器的方式——tablegen，通过它来指定目标的寄存器、指令集、调用约定等，并且tablegen函数以编程的方式缓解了描述一套架构属性所带来的困扰。

LLVM的后端有一套流水线架构，指令经历了许多阶段：从LLVM IR到SelectionDAG、MachineDAG、MachineInstr，最终到MCInst。

IR首先被转为SelectionDAG（**DAG**指的是有向无环图），之后SelectionDAG会被合法化（目标平台不支持的指令会被转换成合法的指令），接着转为MachineDAG（基本上是针对后端的指令选择）。

CPU线性地执行指令序列，指令调度阶段的一个目的就是分配指令的执行顺序，把DAG转换成线性的指令。LLVM的代码生成器使用了一些聪明的启发式算法来尽量产生更快的代码，例如寄存器压力减少。在生成更好的LLVM代码的过程中，寄存器分配策略扮演了一个很重要的角色。

本章描述了如何从头构建LLVM TOY后端。最终，我们能够使用这个样例TOY后端来生成汇编代码。

## 样例后端

本章实现的样例后端是一个简单的RISC风格的架构，它有很少的寄存器（r0~r3）、1个栈寄存器（sp）和1个链接寄存器（lr）用于存储返回地址。

此TOY后端遵循的调用约定和ARM架构相似，传递给函数的参数通过寄存器集合r0~r1存储，而返回值通过r0存储。

# 定义寄存器和寄存器集合

本节介绍如何使用.td文件来定义寄存器和寄存器集合，之后通过tablegen函数可以把.td文件转为.inc文件，而这些文件可以在.cpp文件中通过#include声明引入，进而应用其中定义的寄存器。

## 准备工作

如前面所定义的，我们的TOY目标机器有4个普通寄存器（r0～r3）、1个栈寄存器（sp）、1个链接寄存器（lr）。这些内容可以在TOYRegisterInfo.td文件中指定。tablegen函数提供了Register类，通过继承这个类，可以表示这些寄存器。

## 详细步骤

执行以下步骤，通过目标平台的描述文件来定义后端架构。

1. 在lib/Target目录下创建一个TOY目录：

```
$ mkdir llvm_root_directory/lib/Target/TOY
```

2. 在TOY目录下创建TOYRegisterInfo.td文件：

```
$ cd llvm_root_directory/lib/Target/TOY
$ vi TOYRegisterInfo.td
```

3. 定义硬件编码、命名空间、寄存器、寄存器类：

```
class TOYReg<bits<16> Enc, string n> : Register<n> {
    let HWEencoding = Enc;
```

```
let Namespace = "TOY";
}

foreach i = 0-3 in {
    def R#i : R<i, "r"#i >;
}

def SP : TOYReg<13, "sp">;
def LR : TOYReg<14, "lr">;

def GRRegs : RegisterClass<"TOY", [i32], 32,
    (add R0, R1, R2, R3, SP)>;
```

## 工作原理

tablegen函数处理.td文件以生成.inc文件，并用枚举类型来表示寄存器，于是我们能够在.cpp文件中引用这些枚举类型。例如，r0寄存器可以用TOY::R0引用。在我们构建LLVM项目时会生成这些.inc文件。

## 另请参阅

- 关于更多高级架构（例如ARM）的寄存器定义，请参见LLVM源码库的lib/Target/ARM/ARMRegisterInfo.td文件。

# 定义调用约定

调用约定指的是值如何传递给函数以及如何从函数返回。在TOY架构中，两个参数通过r0和r1这两个寄存器传递，剩下的通过栈传递。本节将介绍如何定义调用约定，它会通过函数指针被ISelLowering（在第6章“平台无关代码生成器”的指令选择lowering阶段提及）使用。

调用约定在TOYCallingConv.td文件中定义，它主要包含两块内容：返回值约定和参数传递约定。返回值约定指的是返回值会如何传递以及通过哪个寄存器传递；参数传递约定指的是参数通过栈还是寄存器传递，以及通过哪个寄存器传递。在定义TOY平台的调用约定时，会继承CallingConv类。

## 详细步骤

执行以下步骤，实现调用约定：

1. 在lib/Target/TOY/目录下，创建TOYCallingConv.td文件：

```
$ vi TOYCallingConv.td
```

2. 在文件中定义返回值约定，如下：

```
def RetCC_TOY : CallingConv<[  
    CCIfType<[i32], CCAssignToReg<[R0]>>,  
    CCIfType<[i32], CCAssignToStack<4, 4>>  
>;
```

3. 同样，定义参数传递约定，如下：

```
def CC_TOY : CallingConv<[  
    CCIfType<[i8, i16], CCPromoteToType<i32>>,  
    CCIfType<[i32], CCAssignToReg<[R0, R1]>>,  
    CCIfType<[i32], CCAssignToStack<4, 4>>
```

]>;

4. 定义被调者保存寄存器（callee saved）集合：

```
def CC_Save : CalleeSavedRegs<(add R2, R3)>;
```

## 工作原理

在前面你看到的.td文件中，指定了32位整数的返回值会存储在r0寄存器当中。当传递参数给函数时，前两个参数会存储于r0和r1寄存器。同样，文件也指定了任何数据类型，例如8位整数或16位整数，都会提升至32位整数。

tablegen函数会为此生成TOYCallingConv.inc文件，在TOYISelLowering.cpp文件中被引用。同时会生成两个用于定义参数处理方式的目标hook函数，LowerFormalArguments()和LowerReturn()。

## 另请参阅

- 关于高级架构（例如ARM）实现的更多内容，请参见lib/Target/ARM/ARM- CallingConv.td文件。

# 定义指令集

一个平台的指令集的定义包含多种此平台的特性。本节介绍如何为目标平台定义指令集。

指令目标描述文件定义了3样内容：操作数、汇编字符串、指令格式。具体包括定义或输出列表，以及使用或输入列表。其中也有不同的操作类，如Register类、立即数，以及更复杂的register+imm操作数。

本节以一个简单的添加指令（它用两个寄存器作为操作数）定义来展示。

## 详细步骤

同样是通过目标描述文件来定义指令集，执行以下步骤。

1. 在lib/Target/TOY/目录下创建TOYInstr.Info.td文件：

```
$ vi TOYInstrInfo.td
```

2. 为采用两个寄存器作为操作数的add指令指定操作数、汇编字符串、指令格式：

```
def ADDrr : InstTOY<(outs GRRegs:$dst),
                     (ins GRRegs:$src1, GRRegs:$src2),
                     "add $dst, $src1, $src2",
[(set i32:$dst, (add i32:$src1, i32:$src2))]>;
```

## 工作原理

从寄存器到寄存器的add指令有3个32位整型操作数，都是寄存器，

其中\$dst作为结果操作数，\$src1和\$src2作为输入操作数，它们都是General Register类型类；指令的汇编字符串，如32位整数类型的"add \$dst, \$src1, \$src2"。

因此，对两个寄存器执行add指令产生的汇编码如下：

```
add r0, r0, r1
```

这条汇编码表示将r0和r1寄存器中的值相加，结果存储于r0寄存器。

## 另请参阅

- 许多指令都有相同类型的指令格式，例如像add、sub等这样的ALU指令，它们的格式都为"dst, src1, src2"，这个多类被用于定义公共属性。关于高级架构（例如ARM）指令集的多种类型的详细信息，请参见lib/Target/ARM/ ARMInstrInfo.td文件。

# 实现栈帧lowering

本节介绍目标架构的栈帧的lowering（从高级抽象到低级抽象）。栈帧lowering包括发射函数调用的头尾代码。

## 准备工作

栈帧lowering需要定义两个函数：TOYFrameLowering::emitPrologue()和TOYFrameLowering::emitEpilogue()。

## 详细步骤

在lib/Target/TOY目录的TOYFrameLowering.cpp文件中定义以下函数。

1. emitPrologue函数定义如下：

```
void TOYFrameLowering::emitPrologue(MachineFunction &MF)
const {
    const TargetInstrInfo &TII =
*MF.getSubtarget().getInstrInfo();
    MachineBasicBlock &MBB = MF.front();
    MachineBasicBlock::iterator MBBI = MBB.begin();
    DebugLoc dl = MBBI != MBB.end() ? MBBI->getDebugLoc() :
    DebugLoc();
    uint64_t StackSize = computeStackSize(MF);
    if (!StackSize) {
        return;
    }
    unsigned StackReg = TOY::SP;
    unsigned OffsetReg = materializeOffset(MF, MBB, MBBI,
```

```

        (unsigned)StackSize);
    if (OffsetReg) {
        BuildMI(MBB, MBBI, dl, TII.get(TOY::SUBrr), StackReg)
            .addReg(StackReg)
            .addReg(OffsetReg)
            .setMIFlag(MachineInstr::FrameSetup);
    } else {
        BuildMI(MBB, MBBI, dl, TII.get(TOY::SUBri), StackReg)
            .addReg(StackReg)
            .addImm(StackSize)
            .setMIFlag(MachineInstr::FrameSetup);
    }
}
}

```

2. emitEpilogue函数定义如下：

```

void TOYFrameLowering::emitEpilogue(MachineFunction &MF,
                                    MachineBasicBlock &MBB)
const {

    const TargetInstrInfo &TII =
        *MF.getSubtarget().getInstrInfo();
    MachineBasicBlock::iterator MBBI =
        MBB.getLastNonDebugInstr();
    DebugLoc dl = MBBI->getDebugLoc();
    uint64_t StackSize = computeStackSize(MF);
    if (!StackSize) {
        return;
    }
    unsigned StackReg = TOY::SP;
    unsigned OffsetReg = materializeOffset(MF, MBB, MBBI,
                                           (unsigned)StackSize);
    if (OffsetReg) {
        BuildMI(MBB, MBBI, dl, TII.get(TOY::ADDrr), StackReg)
            .addReg(StackReg)
            .addReg(OffsetReg)
            .setMIFlag(MachineInstr::FrameSetup);
    } else {
        BuildMI(MBB, MBBI, dl, TII.get(TOY::ADDri), StackReg)
            .addReg(StackReg)
            .addImm(StackSize)
            .setMIFlag(MachineInstr::FrameSetup);
    }
}
}

```

3. 一些为ADD栈操作计算基址偏移的辅助函数：

```

static unsigned materializeOffset(MachineFunction &MF,
MachineBasicBlock &MBB, MachineBasicBlock::iterator MBBI,
unsigned Offset) {
    const TargetInstrInfo &TII =
*MF.getSubtarget().getInstrInfo();
DebugLoc dl = MBBI != MBB.end() ? MBBI->getDebugLoc() :
DebugLoc();
const uint64_t MaxSubImm = 0xffff;
if (Offset <= MaxSubImm) {
    return 0;
} else {
    unsigned OffsetReg = TOY::R2;
    unsigned OffsetLo = (unsigned)(Offset & 0xffff);
    unsigned OffsetHi = (unsigned)((Offset & 0xffff0000) >>
16);
    BuildMI(MBB, MBBI, dl, TII.get(TOY::MOVL0i16),
OffsetReg)
        .addImm(OffsetLo)
        .setMIFlag(MachineInstr::FrameSetup);
    if (OffsetHi) {
        BuildMI(MBB, MBBI, dl, TII.get(TOY::MOVHIi16),
OffsetReg)
            .addReg(OffsetReg)
            .addImm(OffsetHi)
            .setMIFlag(MachineInstr::FrameSetup);
    }
    return OffsetReg;
}
}

```

#### 4. 计算栈大小的辅助函数:

```

uint64_t TOYFrameLowering::computeStackSize(MachineFunction
&MF) const {
    MachineFrameInfo *MFI = MF.getFrameInfo();
    uint64_t StackSize = MFI->getStackSize();
    unsigned StackAlign = getStackAlignment();
    if (StackAlign > 0) {
        StackSize = RoundUpToAlignment(StackSize, StackAlign);
    }
    return StackSize;
}

```

# 工作原理

`emitPrologue`函数首先计算栈大小来决定是否需要头代码，然后计算偏移来调整栈指针。对于尾代码来说，同样需要先检查是否需要尾代码，然后把栈指针还原成函数开始时的样子。

例如，我们看看这段输入IR：

```
%p = alloca i32, align 4
store i32 2, i32* %p
%b = load i32* %p, align 4
%c = add nsw i32 %a, %b
```

生成的TOY汇编码如下：

```
sub sp, sp, #4 ; prologue
movw r1, #2
str r1, [sp]
add r0, r0, #2
add sp, sp, #4 ; epilogue
```

## 另请参阅

- 关于ARM架构的帧lowering信息，请参见  
`lib/Target/ARM/ARMFrame-Lowering.cpp`文件。

# 打印指令

在生成目标代码的过程中，打印汇编指令是很重要的步骤。定义很多类以管道的方式过滤，由之前定义的.td文件提供指令字符串。

## 准备工作

打印指令的第一步，也是最重要的一步，是在.td文件中定义指令字符串，这在“定义指令集”一节中有过介绍。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 在TOY目录下创建新的InstPrinter目录：

```
$ cd lib/Target/TOY
$ mkdir InstPrinter
```

2. 创建TOYInstrFormats.td文件，定义AsmString变量：

```
class InstTOY<dag outs, dag ins, string asmstr, list<dag>
pattern>
    : Instruction {
    field bits<32> Inst;
    let Namespace = "TOY";
    dag OutOperandList = outs;
    dag InOperandList = ins;
    let AsmString = asmstr;
    let Pattern = pattern;
    let Size = 4;
}
```

3. 创建TOYInstPrinter.cpp文件，并定义printOperand函数，如下：

```
void TOYInstPrinter::printOperand(const MCInst *MI,
unsigned OpNo, raw_ostream &O) {
    const MCOperand &Op = MI->getOperand(OpNo);
    if (Op.isReg()) {
        printRegName(O, Op.getReg());
        return;
    }
    if (Op.isImm()) {
        O << "#" << Op.getImm();
        return;
    }
    assert(Op.isExpr() && "unknown operand kind in
printOperand");
    printExpr(Op.getExpr(), O);
}
```

4. 同时还需要定义一个函数来打印寄存器名称：

```
void TOYInstPrinter::printRegName(raw_ostream &OS, unsigned
RegNo) const {
    OS << StringRef(getRegisterName(RegNo)).lower();
}
```

5. 定义一个打印指令的函数：

```
void TOYInstPrinter::printInst(const MCInst *MI,
raw_ostream &O, StringRef Annot) {
    printInstruction(MI, O);
    printAnnotation(O, Annot);
}
```

6. 定义TOYMCAsmInfo.h和TOYMCAsmInfo.cpp文件，指定MCASMinfo来打印指令。

TOYMCAsmInfo.h文件定义如下：

```
#ifndef TOYTARGETASMINFO_H
#define TOYTARGETASMINFO_H
```

```

#include "llvm/MC/MCAsmInfoELF.h"

namespace llvm {
class StringRef;
class Target;

class TOYMCAsmInfo : public MCAsmInfoELF {
    virtual void anchor();
public:
    explicit TOYMCAsmInfo(StringRef TT);
};

} // 命名空间 llvm
#endif

```

TOYMCAsmInfo.cpp文件定义如下：

```

#include "TOYMCAsmInfo.h"
#include "llvm/ADT/StringRef.h"
using namespace llvm;

void TOYMCAsmInfo::anchor() {}

TOYMCAsmInfo::TOYMCAsmInfo(StringRef TT) {
    SupportsDebugInformation = true;
    Data16bitsDirective = "\t.short\t";
    Data32bitsDirective = "\t.long\t";
    Data64bitsDirective = 0;
    ZeroDirective = "\t.space\t";
    CommentString = "#";
    AscizDirective = ".asciiz";

    HiddenVisibilityAttr = MCSA_Invalid;
    HiddenDeclarationVisibilityAttr = MCSA_Invalid;
    ProtectedVisibilityAttr = MCSA_Invalid;
}

```

7. 为指令打印器定义LLVMBuild.txt文件：

```

[component_0]
type = Library
name = TOYAsmPrinter
parent = TOY
required_libraries = MC Support

```

```
add_to_library_groups = TOY
```

## 8. 定义CMakeLists.txt:

```
add_llvm_library(LLVMTOYAsmPrinter
    TOYInstPrinter.cpp
)
```

# 工作原理

在重新构建过LLVM之后，只需要用llc静态编译工具，就能输出TOY架构的汇编码了。

例如，对于以下的IR，用llc工具编译，会生成以下的汇编码：

```
target datalayout = "e-m:e-p:32:32-i1:8:32-i8:8:32-
i16:16:32-i64:32-f64:32-a:0:32-n32"
target triple = "toy"
define i32 @foo(i32 %a, i32 %b) {
    %c = add nsw i32 %a, %b
    ret i32 %c
}

$ llc foo.ll
.text
.file "foo.ll"
.globl foo
.type foo,@function
foo: # @foo
# BB#0: # %entry
add r0, r0, r1
b lr
.Ltmp0:
.size foo, .Ltmp0-foo
```

# 选择指令

DAG中的IR指令需要被映射到特定平台对应的指令。同样，在SDAG节点中会包含IR，需要在特定机器的DAG节点映射。在指令选择阶段之后，得到的结果还需要进行指令调度。

## 准备工作

1. 为了进行特定机器的指令选择，需要定义一个独立的TOYDAGToDAGISel类，因此为了编译包含这个类定义的文件，需要把文件名添加到TOY/CMakeLists.txt文件中：

```
$ vi CMakeLists.txt
add_llvm_target(
...
TOYISelDAGToDAG.cpp
...
)
```

2. 在TOYTargetMachine.h和TOYTargetMachine.cpp文件中添加Pass条目：

```
$ vi TOYTargetMachine.h
const TOYInstrInfo *getInstrInfo() const override {
    return getSubtargetImpl()->getInstrInfo();
}
```

3. 在TOYTargetMachine.cpp文件中增加以下代码，在指令选择阶段创建一个Pass：

```
class TOYPassConfig : public TargetPassConfig {
public:
...
virtual bool addInstSelector();
};
```

```
...  
bool TOYPassConfig::addInstSelector() {  
    addPass(createTOYISelDag(getTOYTargetMachine()));  
    return false;  
}
```

## 详细步骤

执行以下步骤， 定义指令选择函数。

1. 创建TOYISelDAGToDAG.cpp文件：

```
$ vi TOYISelDAGToDAG.cpp
```

2. 引入以下头文件：

```
#include "TOY.h"  
#include "TOYTargetMachine.h"  
#include "llvm/CodeGen/SelectionDAGISel.h"  
#include "llvm/Support/Compiler.h"  
#include "llvm/Support/Debug.h"  
#include "TOYInstrInfo.h"
```

3. 定义TOYDAGToDAGISel类， 继承自SelectionDAGISel类， 如下：

```
class TOYDAGToDAGISel : public SelectionDAGISel {  
    const TOYSubtarget &Subtarget;  
  
public:  
    explicit TOYDAGToDAGISel(TOYTargetMachine &TM,  
        CodeGenOpt::Level OptLevel)  
    : SelectionDAGISel(TM, OptLevel), Subtarget(*TM.  
        getSubtargetImpl()) {}  
};
```

4. 这个类中要定义的最重要的函数是Select()， 它依据机器指令返回一个SDNode对象。

在类中声明：

```
SDNode *Select(SDNode *N);
```

进一步定义：

```
SDNode *TOYDAGToDAGISel::Select(SDNode *N) {
    return SelectCode(N);
}
```

5. 另一个重要的函数是定义地址选择函数，它会计算加载、存储操作的基址和偏移。

声明如下：

```
bool SelectAddr(SDValue Addr, SDValue &Base, SDValue &Offset);
```

进一步定义如下：

```
bool TOYDAGToDAGISel::SelectAddr(SDValue Addr, SDValue
&Base, SDValue &Offset) {
    if (FrameIndexSDNode *FIN =
dyn_cast<FrameIndexSDNode>(Addr)) {
        Base = CurDAG->getTargetFrameIndex(FIN->getIndex(),
                                             getTargetLowering()-
                                             >getPointerTy());
        Offset = CurDAG->getTargetConstant(0, MVT::i32);
        return true;
    }
    if (Addr.getOpcode() == ISD::TargetExternalSymbol ||
        Addr.getOpcode() == ISD::TargetGlobalAddress ||
        Addr.getOpcode() == ISD::TargetGlobalTLSAddress) {
        return false; // 直接调用
    }
    Base = Addr;
    Offset = CurDAG->getTargetConstant(0, MVT::i32);
    return true;
}
```

6. 最后，createTOYISelDag Pass把合法的DAG转为TOY平台的

DAG，并且为定义于同一文件中的指令调度做准备：

```
FunctionPass *llvm::createTOYISelDag(TOYTargetMachine &TM,
CodeGenOpt::Level OptLevel) {
return new TOYDAGToDAGISel(TM, OptLevel);
}
```

## 工作原理

TOYISelDAGToDAG.cpp中的TOYDAGToDAGISel::Select()函数用于选择DAG节点的操作码，而TOYDAGISel::SelectAddr()则用于选择DataDAG节点的addr类型。需要注意的是，如果地址是全局的或者是外部的，则返回false，因为它需要在全局上下文中计算。

## 另请参阅

- 关于一些复杂架构（例如ARM架构）的DAG机器指令选择，请参见LLVM源码库的lib/Target/ARM/ARMSelDAGToDAG.cpp文件。

# 增加指令编码

如果指令需要进行编码<sup>[1]</sup>，即如何用位字段表示，那么可以在.td文件中定义指令的时候指定位字段。

## 详细步骤

为了在定义指令的时候包含指令编码，需要执行以下步骤。

1. 对于注册add指令的一个寄存器操作数，会有一些定义的指令编码。指令的大小是32位的，它的编码如下：

```
bits 0 to 3 -> src2, second register operand
bits 4 to 11 -> all zeros
bits 12 to 15 -> dst, for destination register
bits 16 to 19 -> src1, first register operand
bit 20 -> zero
bit 21 to 24 -> for opcode
bit 25 to 27 -> all zeros
bit 28 to 31 -> 1110
```

这可通过在.td文件中指定位模式来实现。

2. 在TOYInstrFormats.td文件中定义名为Inst的变量：

```
class InstTOY<dag outs, dag ins, string asmstr, list<dag>
pattern>
    : Instruction {
    field bits<32> Inst;

    let Namespace = "TOY";
    ...
    ...
    let AsmString = asmstr;
    ...
    ...
}
```

```
}
```

### 3. 在TOYInstrInfo.td文件中定义指令编码:

```
def ADDrr : InstTOY<(outs GRRegs:$dst),(ins GRRegs:$src1,  
GRRegs:$src2) ... > {  
bits<4> src1;  
bits<4> src2;  
bits<4> dst;  
let Inst{31-25} = 0b1100000;  
let Inst{24-21} = 0b1100; // 操作码  
Let Inst{20} = 0b0;  
Let Inst{19-16} = src1; // 操作数 1  
Let Inst{15-12} = dst; // 目标  
Let Inst{11-4} = 0b00000000;  
Let Inst{3-0} = src2;  
}
```

### 4. 在TOY/MCTargetDesc/TOYMCCodeEmitter.cpp文件中，如果机器指令的操作数是寄存器，那么就会调用编码函数:

```
unsigned TOYMCCodeEmitter::getMachineOpValue(const MCInst  
&MI,  
                                              const  
                                              MCOperand &MO,  
                                              SmallVectorImpl<MCFixup> &Fixups,  
                                              const  
                                              MCSubtargetInfo &STI) const {  
    if (MO.isReg()) {  
        return CTX.getRegisterInfo()->getEncodingValue(MO.getReg());  
    }  
}
```

### 5. 在同一个文件中，指定编码指令的函数:

```
void TOYMCCodeEmitter::EncodeInstruction(const MCInst &MI,  
raw_ostream &OS, SmallVectorImpl<MCFixup> &Fixups, const  
MCSubtargetInfo &STI) const {  
    const MCInstrDesc &Desc = MCII.get(MI.getOpcode());  
    if (Desc.getSize() != 4) {  
        llvm_unreachable("Unexpected instruction size!");  
    }  
}
```

```
    const uint32_t Binary = getBinaryCodeForInstr(MI,  
Fixups, STI);  
  
    EmitConstant(Binary, Desc.getSize(), OS);  
    ++MCNumEmitted;  
}
```

## 工作原理

在.td文件中，指令的编码通过为其操作数、目标、参数状态、操作码来编码（指令每一位的存储内容）而实现。同样，tablegen会为.td生成.inc文件，而机器码发射器可以通过函数调用来获得这些编码。它编码这些指令并为打印指令发射相同内容。

## 另请参阅

- 关于一些复杂架构（例如ARM架构）的指令编码，请参见LLVM代码库的lib/Target/ARM/ARMInstrInfo.td文件。

# 子平台支持

目标平台可能还会有子平台（平台的变体）——在一些细节的处理上存在不同，例如指令中操作数的处理，而这些子平台特性在LLVM后端中也得到了支持。子平台可能包含额外的指令、寄存器、调度模型等。例如ARM有子平台NEON和THUMB，x86有一些子平台特性SSE、AVX等。子平台的指令集特性有所不同，例如ARM的子平台NEON和支持向量指令的SSE/AVX，SSE/AVX也支持向量指令集，但它们的指令互不相同。

## 详细步骤

本节介绍如何在后端加入对子平台的支持，首先需要定义一个继承TargetSubtar\_getInfo类的子类。

1. 创建TOYSubtarget.h文件：

```
$ vi TOYSubtarget.h
```

2. 引入以下头文件：

```
#include "TOY.h"
#include "TOYFrameLowering.h"
#include "TOYISelLowering.h"
#include "TOYInstrInfo.h"
#include "TOYSelectionDAGInfo.h"
#include "TOYSubtarget.h"
#include "llvm/Target/TargetMachine.h"
#include "llvm/Target/TargetSubtargetInfo.h"
#include "TOYGenSubtargetInfo.inc"
```

3. 定义TOYSubtarget类，它包含一些私有成员来表示子平台的数据布局、目标lowering、DAG指令选择、目标帧lowering等信息：

```
class TOYSubtarget : public TOYGenSubtargetInfo {  
    virtual void anchor();  
  
private:  
    const DataLayout DL;      // 计算类型大小和对齐方式  
    TOYInstrInfo InstrInfo;  
    TOYTargetLowering TLInfo;  
    TOYSelectionDAGInfo TSInfo;  
    TOYFrameLowering FrameLowering;  
    InstrItineraryData InstrItins;
```

#### 4. 声明构造函数:

```
TOYSubtarget(const std::string &TT, const std::string &CPU,  
const std::string &FS, TOYTargetMachine &TM);
```

这个构造函数初始化数据成员以匹配特定的三元组。

#### 5. 定义返回类相关数据的辅助函数:

```
const InstrItineraryData *getInstrItineraryData() const override  
    return &InstrItins;  
}  
  
const TOYInstrInfo *getInstrInfo() const override { return  
&InstrInfo; }  
  
const TOYRegisterInfo *getRegisterInfo() const override {  
    return &InstrInfo.getRegisterInfo();  
}  
  
const TOYTargetLowering *getTargetLowering() const override {  
    return &TLInfo;  
}  
  
const TOYFrameLowering *getFrameLowering() const override {  
    return &FrameLowering;  
}  
  
const TOYSelectionDAGInfo *getSelectionDAGInfo() const override {  
    return &TSInfo;  
}  
const DataLayout *getDataLayout() const override { return &DL; }
```

```
void ParseSubtargetFeatures(StringRef CPU, StringRef FS);
```

## 6. 创建TOYSubtarget.cpp文件，定义构造函数：

```
TOYSubtarget::TOYSubtarget(const std::string &TT, const
std::string &CPU, const std::string &FS, TOYTargetMachine &TM)
    DL("e-m:e-p:32:32-i1:8:32-i8:8:32-i16:16:32-i64:32-
f64:32-a:0:32-n32"),
    InstrInfo(), TLInfo(TM), TSInfo(DL), FrameLowering()
{}
```

子平台定义了自己的数据布局，包含一些如栈帧lowering、指令、子平台等信息。

## 另请参阅

- 关于子平台的具体实现，请参见LLVM源码中的 lib/Target/ARM/ARM Subtar\_.get.cpp 文件。

# 多指令lowering

我们用实现操作32位立即数的load指令为例，用两个指令操作高低位来实现，MOVW移动低16位立即数，清除高16位；MOVT移动高16位立即数。

## 详细步骤

实现多指令lowering有多种方法，我们可以用伪指令（pseudo-instruction）或者在选择DAG到DAG阶段完成。

1. 如果不用伪指令完成，先定义一些约束——两条指令必须是有序的。MOVW清除高16位，而其输出可以被MOVT读取来填充目标的高16位。在tablegen中可以指定这个约束：

```
def MOVL0i16 : MOV<0b1000, "movw", (ins i32imm:$imm),  
           [(set i32:$dst, i32imm_lo:$imm)]>;  
def MOVH0i16 : MOV<0b1010, "movt", (ins GRRegs:$src1,  
i32imm:$imm),  
           /* 没有模式 */>;
```

第2种方式是在.td文件定义伪指令：

```
def MOVi32 : InstTOY<(outs GRRegs:$dst), (ins i32imm:$src), "",  
[(set i32:$dst, movei32 imm:$src)]> {  
    let isPseudo = 1;  
}
```

2. 然后伪指令被TOYInstrInfo.cpp文件的一个目标函数lower：

```
bool  
TOYInstrInfo::expandPostRAPpseudo(MachineBasicBlock::iterator  
MI) const {  
    if (MI->getOpcode() == TOY::MOVi32){  
        DebugLoc DL = MI->getDebugLoc();
```

```

MachineBasicBlock &MBB = *MI->getParent();

const unsigned DstReg = MI->getOperand(0).getReg();
const bool DstIsDead = MI->getOperand(0).isDead();

const MachineOperand &MO = MI->getOperand(1);

auto L016 = BuildMI(MBB, MI, DL, get(TOY::MOVLOi16),
DstReg);
auto HI16 = BuildMI(MBB, MI, DL, get(TOY::MOVHHi16))
    .addReg(DstReg, RegState::Define | 
getDeadRegState(DstIsDead))
    .addReg(DstReg);

MBB.erase(MI);
return true;
}
}

```

### 3. 编译整个LLVM项目：

例如，包含IR的ex.ll文件如下：

```

define i32 @foo(i32 %a) #0 {
%b = add nsw i32 %a, 65537 ; 0x00010001
ret i32 %b
}

```

得到的汇编码如下：

```

movw r1, #1
movt r1, #1
add r0, r0, r1
b lr

```

## 工作原理

第1条指令movw，移动低16位的1并清除高16位，于是在r1中第1条会写入0x00000001。下一条指令movt，会写高16位，于是在r1中会写入

0x0001XXXX（没有改变低16位）。最终，r1的值是0x00010001。事实上，任何时候在.td文件中遇到伪指令，都会调用它的扩展函数来展开伪指令。

在前面的例子中，mov32立即数通过两条指令来实现：movw（低16位）和movt（高16位）。在.td文件中它被标记为伪指令，如果需要发射这条伪指令，就会调用它的扩展函数，接着构建两条机器指令MOVLOi16和MOVHHi16。这两条指令对应了目标架构的movw和movt指令。

## 另请参阅

- 关于多指令lowering的详细信息，请参见LLVM源码中的ARM目标平台的实现，lib/Target/ARM/ARMInstrInfo.td文件。

# 平台注册

如果要在TOY目标架构中运行llc工具，还需要把TOY注册到llc工具。本节介绍修改配置文件来注册目标平台。同样，本节会修改构建文件。

## 详细步骤

执行以下步骤，以注册目标平台到一个静态编译器中：

1. 首先在llvm\_root\_dir/CMakeLists.txt中加入TOY后端的条目：

```
set(LLVM_ALL_TARGETS
    AArch64
    ARM
    ...
    ...
    TOY
)
```

2. 然后在llvm\_root\_dir/include/llvm/ADT/Triple.h中加入TOY的条目：

```
class Triple {
public:
    enum ArchType {
        UnknownArch,
        arm,      // ARM (little endian): arm, armv.* , xscale
        armeb,    // ARM (big endian): armeb
        aarch64,  // AArch64 (little endian): aarch64
        ...
        ...
    };
    toy      // TOY: toy
};
```

3. 在llvm\_root\_dir/include/llvm/MC/MCE Expr.h中加入TOY条目：

```
class MCSymbolRefExpr : public MCE Expr {  
public:  
enum VariantKind {  
    ...  
    VK_TOY_LO,  
    VK_TOY_HI,  
};
```

4. 在llvm\_root\_dir/include/llvm/Support/ELF.h中加入TOY条目：

```
enum {  
    EM_NONE      = 0, // 非平台  
    EM_M32       = 1, // AT&T WE 32100  
    ...  
    ...  
    EM_TOY       = 220 // 是下一个数  
};
```

5. 然后，在lib/MC/MCE Expr.cpp中加入TOY条目：

```
StringRef MCSymbolRefExpr::getVariantKindName(VariantKind  
Kind) {  
switch (Kind) {  
    ...  
    ...  
    case VK_TOY_LO: return "TOY_LO";  
    case VK_TOY_HI: return "TOY_HI";  
}  
...  
}
```

6. 接着，在lib/Support/Triple.cpp中加入TOY条目：

```
const char *Triple::getArchTypeName(ArchType Kind) {  
    switch (Kind) {  
        ...  
        ...  
        case toy:           return "toy";
```

```
}

const char *Triple::getArchTypePrefix(ArchType Kind) {
    switch (Kind) {
    ...
    ...
    case toy:      return "toy";
    }
}

Triple::ArchType Triple::getArchTypeForLLVMName(StringRef Name) {
...
...
    .Case("toy", toy)
...
}

static Triple::ArchType parseArch(StringRef ArchName) {
...
...
    .Case("toy", Triple::toy)
...
}

static unsigned
getArchPointerBitWidth(llvm::Triple::ArchType Arch) {
...
...
case llvm::Triple::toy:
    return 32;

...
...
}

Triple Triple::get32BitArchVariant() const {
...
...
case Triple::toy:
    // 已经是32位
    break;
...
}

Triple Triple::get64BitArchVariant() const {
...
...
```

```

case Triple::toy:
    T.setArch(UnknownArch);
    break;
...
...
}

```

7. 在lib/Target/LLVMBuild.txt中加入TOY条目：

```

[common]
subdirectories = ARM AArch64 CppBackend Hexagon MSP430 ... ...
TOY

```

8. 在lib/Target/TOY目录下创建TOY.h文件：

```

#ifndef TARGET_TOY_H
#define TARGET_TOY_H

#include "MCTargetDesc/TOYMCTargetDesc.h"
#include "llvm/Target/TargetMachine.h"

namespace llvm {
class TargetMachine;
class TOYTargetMachine;

FunctionPass *createTOYISelDag(TOYTargetMachine &TM,
                               CodeGenOpt::Level OptLevel);
} // 结束llvm命名空间

#endif

```

9. 在lib/Target/TOY目录创建TargetInfo目录，在其中创建TOYTargetInfo.cpp文件：

```

#include "TOY.h"
#include "llvm/IR/Module.h"
#include "llvm/Support/TargetRegistry.h"
using namespace llvm;

Target llvm::TheTOYTarget;
extern "C" void LLVMInitializeTOYTargetInfo() {
    RegisterTarget<Triple::toy> X(TheTOYTarget, "toy",
                                    "TOY");
}

```

}

10. 在相同的目录中创建CMakeLists.txt文件:

```
add_llvm_library(LLVMT0YInfo
    TOYTargetInfo.cpp
)
```

11. 创建LLVMBuild.txt文件:

```
[component_0]
type = Library
name = TOYInfo
parent = TOY
required_libraries = Support
add_to_library_groups = TOY
```

12. 在lib/Target/TOY目录创建TOYTargetMachine.cpp文件:

```
#include "TOYTargetMachine.h"
#include "TOY.h"
#include "TOYFrameLowering.h"
#include "TOYInstrInfo.h"
#include "TOYISelLowering.h"
#include "TOYSelectionDAGInfo.h"
#include "llvm/CodeGen/Passes.h"
#include "llvm/IR/Module.h"
#include "llvm/PassManager.h"
#include "llvm/Support/TargetRegistry.h"
using namespace llvm;

TOYTargetMachine::TOYTargetMachine(const Target &T, StringRef TT,
StringRef CPU, StringRef FS, const TargetOptions &Options,
Reloc::Model RM, CodeModel::Model CM,
                                    CodeGenOpt::Level OL)
    : LLVMTargetMachine(T, TT, CPU, FS, Options, RM, CM,
OL),
      Subtarget(TT, CPU, FS, *this) {
    initAsmInfo();
}

namespace {
class TOYPassConfig : public TargetPassConfig {
```

```

public:
    TOYPassConfig(TOYTargetMachine *TM, PassManagerBase &PM)
        : TargetPassConfig(TM, PM) {}

    TOYTargetMachine &getTOYTargetMachine() const {
        return getTM<TOYTargetMachine>();
    }

    virtual bool addPreISel();
    virtual bool addInstSelector();
    virtual bool addPreEmitPass();
};

} // 命名空间

TargetPassConfig
*TOYTargetMachine::createPassConfig(PassManagerBase &PM) {
    return new TOYPassConfig(this, PM);
}

bool TOYPassConfig::addPreISel() { return false; }

bool TOYPassConfig::addInstSelector() {
    addPass(createTOYISelDag(getTOYTargetMachine(),
        getOptLevel()));
    return false;
}

bool TOYPassConfig::addPreEmitPass() { return false; }

// 强制静态初始化
extern "C" void LLVMInitializeTOYTarget() {
    RegisterTargetMachine<TOYTargetMachine> X(TheTOYTarget);
}

void TOYTargetMachine::addAnalysisPasses(PassManagerBase
&PM) {}

```

13. 创建一个新的目录MCTargetDesc，在其中创建文件TOYMCTargetDesc.h:

```

#ifndef TOYMCTARGETDESC_H
#define TOYMCTARGETDESC_H

#include "llvm/Support/DataTypes.h"

namespace llvm {

```

```

class Target;
class MCInstrInfo;
class MCRegisterInfo;
class MCSubtargetInfo;
class MCContext;
class MCCodeEmitter;
class MCAsmInfo;
class MCCodeGenInfo;
class MCInstPrinter;
class MCObjectWriter;
class MCAsmBackend;

class StringRef;
class raw_ostream;

extern Target TheTOYTarget;

MCCodeEmitter *createTOYMCCodeEmitter(const MCInstrInfo &MCII,
const MCRegisterInfo &MRI, const MCSubtargetInfo &STI, MCContext
&Ctx);

MCAsmBackend *createTOYAsmBackend(const Target &T, const
MCRegisterInfo &MRI, StringRef TT, StringRef CPU);
MCObjectWriter *createTOYELFObjectWriter(raw_ostream &OS,
uint8_t OSABI);

} // 结束llvm命名空间

#define GET_REGINFO_ENUM
#include "TOYGenRegisterInfo.inc"

#define GET_INSTRINFO_ENUM
#include "TOYGenInstrInfo.inc"

#define GET_SUBTARGETINFO_ENUM
#include "TOYGenSubtargetInfo.inc"

#endif

```

14. 在相同的目录下创建TOYMCTargetDesc.cpp文件：

```

#include "TOYMCTargetDesc.h"
#include "InstPrinter/TOYInstPrinter.h"
#include "TOYMCAsmInfo.h"
#include "llvm/MC/MCCodeGenInfo.h"

```



```
CodeGenOpt::Level OL
```

```
{  
    MCCodeGenInfo *X = new MCCodeGenInfo();  
    if (RM == Reloc::Default) {  
        RM = Reloc::Static;  
    }  
    if (CM == CodeModel::Default) {  
        CM = CodeModel::Small;  
    }  
    if (CM != CodeModel::Small && CM != CodeModel::Large) {  
        report_fatal_error("Target only supports CodeModel  
Small or Large");  
    }  
  
    X->InitMCCodeGenInfo(RM, CM, OL);  
    return X;  
}  
  
static MCInstPrinter *  
createTOYMCInstPrinter(const Target &T, unsigned  
SyntaxVariant,  
                      const MCAsmInfo &MAI, const  
MCInstrInfo &MII,  
                      const MCRegisterInfo &MRI, const  
MCSubtargetInfo &STI) {  
    return new TOYInstPrinter(MAI, MII, MRI);  
}  
  
static MCStreamer *  
createMCAsmStreamer(MCContext &Ctx, formatted_raw_ostream  
&OS, bool isVerboseAsm, bool useDwarfDirectory, MCInstPrinter  
*InstPrint, MCCodeEmitter *CE, MCAsmBackend *TAB, bool ShowInst) {  
    return createAsmStreamer(Ctx, OS, isVerboseAsm,  
useDwarfDirectory, InstPrint, CE, TAB, ShowInst);  
}  
  
static MCStreamer *createMCStreamer(const Target &T,  
StringRef TT,  
                      MCContext &Ctx,  
MCAsmBackend &MAB,  
                      raw_ostream &OS,  
                      MCCodeEmitter *Emitter,  
const MCSubtargetInfo  
&STI,  
                      bool RelaxAll,  
                      bool NoExecStack) {  
    return createELFStreamer(Ctx, MAB, OS, Emitter, false,  
NoExecStack);  
}
```

```

}

// 强制静态初始化
extern "C" void LLVMInitializeTOYTargetMC() 007B
// 注册MC asm信息
RegisterMCAsmInfoFn X(TheTOYTarget, createTOYMCAsmInfo);

// 注册MC codegen信息
TargetRegistry::RegisterMCCodeGenInfo(TheTOYTarget,
createTOYMCCodeGenInfo);

// 注册MC指令信息
TargetRegistry::RegisterMCInstrInfo(TheTOYTarget,
createTOYMCInstrInfo);

// 注册MC寄存器信息
TargetRegistry::RegisterMCRegInfo(TheTOYTarget,
createTOYMCRegisterInfo);

// 注册MC子平台信息
TargetRegistry::RegisterMCSubtargetInfo(TheTOYTarget,
createTOYMCSubtargetInfo);

// 注册MCInstPrinter
TargetRegistry::RegisterMCInstPrinter(TheTOYTarget,
createTOYMCInstPrinter);
// 注册ASM后端
TargetRegistry::RegisterMCAsmBackend(TheTOYTarg0065t,
createTOYAsmBackend);

// 注册assembly streamer
TargetRegistry::RegisterAsmStreamer(TheTOYTarget,
createMCAsmStreamer);

// 注册object streamer
TargetRegistry::RegisterMCObjectStreamer(TheTOYTarget,
createMCStreamer);

// 注册MCCodeEmitter
TargetRegistry::RegisterMCCodeEmitter(TheTOYTarget,
createTOYMCCodeEmitter);
}

```

15. 在相同的目录中创建LLVMBuild.txt文件:

```
[component_0]
```

```
type = Library
name = TOYDesc
parent = TOY
required_libraries = MC Support TOYAsmPrinter TOYInfo
add_to_library_groups = TOY
```

### 16. 创建CMakeLists.txt文件：

```
add_llvm_library(LLVMTOYDesc
    TOYMCTargetDesc.cpp)
```

## 工作原理

构建整个LLVM项目，如下：

```
$ cmake llvm_src_dir -DCMAKE_BUILD_TYPE=Release -
DLLVM_TARGETS_TO_BUILD="TOY"
$ make
```

这里我们指定了为TOY目标平台构建LLVM编译器，在构建完成后，通过llc命令可以检查LLVM是否支持TOY目标平台：

```
$ llc -version
...
...
Registered Targets :
toy - TOY
```

## 另请参阅

- 关于复杂目标平台的更多知识，例如流水线、调度，请参见Chen Chung-Shu和Anoushe Jamshidi写的Tutorial: *Creating an LLVM Backend for the Cpu0 Architecture*中的章节。

---

[\[1\]](#)指令编码：之前说的汇编码指的是具有可读性的代码，但这种形式的缺陷在于不够紧凑，占据的空间会比较大，因此常常还需要对其进行编码，得到更加紧凑的表示。这如同LLVM IR和bitcode的关系。——译者注

# 第9章 LLVM项目最佳实践

本章涵盖以下话题：

- LLVM中的异常处理
- 使用sanitizer
- 使用LLVM编写垃圾回收器
- 将LLVM IR转换为JavaScript
- 使用Clang静态分析器
- 使用bugpoint
- 使用LLDB
- 使用LLVM通用Pass

# 概述

到目前为止，你已经学了如何编写编译器的前端、优化器以及后端。在本书的最后一章，我们来看看LLVM的其他特性，以及如何在我们的项目中使用。本节的主要目的是让你了解LLVM中一些重要的工具和技术，它们往往是LLVM的热点。因此，不会深入介绍每一个主题的细节。

# LLVM中的异常处理

本节介绍LLVM的异常处理机制。我们会讨论LLVM IR如何表示和处理异常，以及LLVM提供的关于异常处理的内建函数。

## 准备工作

你需要知道异常处理是如何正常运作的，以及try、catch、throw等一些概念。同时你需要在PATH安装Clang和LLVM。

## 详细步骤

让我们从一个具体的例子来看看LLVM中的异常处理。

1. 创建一个文件来编写源码，以测试异常处理机制：

```
$ cat eh.cpp
class Ex1 {};
void throw_exception(int a, int b) {
    Ex1 ex1;
    if (a > b) {
        throw ex1;
    }
}

int test_try_catch() {
    try {
        throw_exception(2, 1);
    }
    catch(...) {
        return 1;
    }
    return 0;
}
```

2. 使用以下命令来生成bitcode文件:

```
$ clang -c eh.cpp -emit-llvm -o eh.bc
```

3. 查看屏幕上显示的IR, 执行以下命令, 输出如下:

```
$ llvm-dis eh.bc -o -
; ModuleID = 'eh.bc'
target datalayout = "e-m:e-i64:64-f80:128-n8:16:32:64-S128"
target triple = "x86_64-unknown-linux-gnu"

%class.Ex1 = type { i8 }

 @_ZTVN10__cxxabiv117__class_type_infoE = external global i8*
 @_ZTS3Ex1 = linkonce_odr constant [5 x i8] c"3Ex1\00"
 @_ZTI3Ex1 = linkonce_odr constant { i8*, i8* } { i8* bitcast
(i8** getelementptr inbounds (i8** @_ZTVN10__cxxabiv117__class_
type_infoE, i64 2) to i8*), i8*
getelementptr inbounds ([5 x i8]* @_ZTS3Ex1, i32 0, i32 0) }

; Function Attrs: uwtable
define void @_Z15throw_exceptionii(i32 %a, i32 %b) #0 {
    %1 = alloca i32, align 4
    %2 = alloca i32, align 4
    %ex1 = alloca %class.Ex1, align 1
    store i32 %a, i32* %1, align 4
    store i32 %b, i32* %2, align 4
    %3 = load i32* %1, align 4
    %4 = load i32* %2, align 4
    %5 = icmp sgt i32 %3, %4
    br i1 %5, label %6, label %9

; <label>:6           ; preds = %0
    %7 = call i8* @_cxa_allocate_exception(i64 1) #1
    %8 = bitcast i8* %7 to %class.Ex1*
    call void @_cxa_throw(i8* %7, i8* bitcast ({ i8*, i8* }*
 @_ZTI3Ex1 to i8*), i8* null) #2
    Unreachable

; <label>:9           ; preds = %0
    ret void
}
declare i8* @_cxa_allocate_exception(i64)

declare void @_cxa_throw(i8*, i8*, i8*)
```

```

; Function Attrs: uwtable
define i32 @_Z14test_try_catchv() #0 {
    %1 = alloca i32, align 4
    %2 = alloca i8*
    %3 = alloca i32
    %4 = alloca i32
    invoke void @_Z15throw_exceptionii(i32 2, i32 1)
        to label %5 unwind label %6

; <label>:5          ; preds = %0
    br label %13

; <label>:6          ; preds = %0
    %7 = landingpad { i8*, i32 } personality i8* bitcast (i32
(...)* @_gxx_personality_v0 to i8*)
        catch i8* null
    %8 = extractvalue { i8*, i32 } %7, 0
    store i8* %8, i8** %2
    %9 = extractvalue { i8*, i32 } %7, 1
    store i32 %9, i32* %3
    br label %10

; <label>:10         ; preds = %6
    %11 = load i8** %2
    %12 = call i8* @_cxa_begin_catch(i8* %11) #1
    store i32 1, i32* %1
    store i32 1, i32* %4
    call void @_cxa_end_catch()
    br label %14

; <label>:13         ; preds = %5
    store i32 0, i32* %1
    br label %14
; <label>:14
%13, %10          ; preds =
    %15 = load i32* %1
    ret i32 %15
}

declare i32 @_gxx_personality_v0(...)

declare i8* @_cxa_begin_catch(i8*)

declare void @_cxa_end_catch()

attributes #0 = { uwtable "less-precise-fpmad"="false" "no-
frame-pointer-elim"="true" "no-frame-pointer-elim-non-leaf"

```

```
"no-infs-fp-math"="false" "no-nans-fp-math"="false" "stack-  
protector-buffer-size"="8" "unsafe-fp-math"="false" "use-soft-  
float"="false" }  
attributes #1 = { nounwind }  
attributes #2 = { noreturn }  
  
!llvm.ident = !{!0}  
  
!0 = metadata !{metadata !"clang version 3.6.0 (220636)"}
```

## 工作原理

LLVM是这样实现异常的：当异常被抛出，运行时（runtime）会查找异常处理器。它会查找抛出异常的那个函数对应的异常帧，而这个异常处理器与异常帧相关联，并且包含异常表的引用，而异常表中则包含了异常处理的具体实现，也就是如果这门编程语言支持异常处理，抛出异常时如何处理。如果这门语言不支持异常处理，那么关于如何展开当前活动记录和还原前一个活动记录的状态的相关信息则会在异常帧中。

让我们通过之前的例子来看看异常处理在LLVM中是如何具体实现的。

try区块在LLVM中被翻译成invoke指令：

```
invoke void @_Z15throw_exceptionii(i32 2, i32 1)  
        to label %5 unwind label %6
```

上面的代码告诉编译器如果throw\_exception函数抛出异常，它应该如何处理这个异常。如果throw\_exception没有抛出异常，正常执行跳转到label %5，否则跳转到label %6，即landing pad，这对应了try/catch中的catch机制。如果程序执行在landing pad重新开始，它会接收一个异常结构体，以及与抛出的异常类型对应的选择器的值。这个选择器用于决定哪一个catch函数来真正处理这个异常。在本例中，它看起来像这样：

```
%7 = landingpad { i8*, i32 } personality i8* bitcast (i32 (...)*)  
@__cxx_personality_v0 to i8*)  
    catch i8* null
```

%7那一段代码描述了异常信息。{i8\*, i32}部分描述异常类型，i8\*是异常指针，而i32是异常选择器的值。在这里我们只有一个选择器的值，所以catch函数会接受所有抛出类型的异常。@\_\_gxx\_personality\_v0函数是personality函数，它接受异常的上下文(context)，即一个包含异常对象类型和值的异常结构体，以及一个当前函数异常表的引用。当前编译单元的personality函数在公共异常帧指定。本例中，@\_\_gxx\_personality\_v0函数则表示我们在处理C++异常。

所以%8 = extractvalue { i8\*, i32 } %7, 0 表示异常对象，而%9 = extractvalue { i8\*, i32 } %7, 1则表示选择器值。

下面是一些值得注意的IR函数。

- `__cxa_thow`: 用于抛出异常的函数。
- `__cxa_begin_catch`: 接受一个异常结构体的引用作为参数，返回异常对象的值。
- `__cxa_end_catch`: 处理最近捕捉的异常，减少handler计数，如果计数为0则停止异常捕捉。

## 另请参阅

- 关于LLVM的异常格式，请参见<http://llvm.org/docs/ExceptionHandling.html#llvm-code-generation>。

# 使用sanitizer

如果你有过内存调试的经验，那么你应该用过**Valgrind**这样的工具。同样，LLVM也提供了内存调试的工具，例如地址sanitizer、内存sanitizer等。这些工具虽然没有Valgrind那么成熟，但是相比之下速度更快。这些工具大部分都还在开发实验阶段，所以你也可以参与这些开源软件的开发。

## 准备工作

如果要使用sanitizer，需要从LLVM SVN把compiler-rt的代码检出来：

```
cd llvm/projects
svn co http://llvm.org/svn/llvm-project/compiler-
rt/trunk compiler-rt
```

如第1章“LLVM设计与使用”所描述的，重新构建LLVM，这样我们就能获得所需的运行时库了。

## 详细步骤

执行以下步骤，测试地址sanitizer。

1. 编写测试实例，检查地址sanitizer：

```
$ cat asan.c
int main() {
int a[5];
int index = 6;
int retval = a[index];
return retval;
```

}

2. 使用fsanitize=address命令行参数编译测试代码，以使用地址sanitizer：

```
$ clang -fsanitize=address asan.c
```

3. 使用以下命令执行地址sanitizer：

```
$ ASAN_SYMBOLIZER_PATH=/usr/local/bin/llvm-symbolizer ./a.out
```

输出如下：



# 工作原理

LLVM地址sanitizer的工作原理是将代码仪表化。这个工具由编译器仪表化模块和运行时库组成。代码仪表化部分的工作由LLVM Pass完成，由命令行参数fsanitize= address唤起，检查每一条指令，之前的例子已经展示。而运行时库则把代码中的malloc和free函数替换为自定义的代码。在我们进一步讨论如何进行代码仪表化之前，我们先来看看虚拟地址空间如何分为两个独立的类：一块是主应用内存，由常规的应用代码使用；另一块是shadow内存，包含shadow值（元数据）。

shadow内存和主应用内存是相互关联的，使用主内存中的一个地址意味着相应地在shadow内存写入一个特殊值。

让我们回到地址sanitizer，malloc函数分配的地址我们称之为污染过的，而free函数释放的地址会放在隔离区，也是污染过的。程序中每一个内存访问会被编译器进行如下转换。

首先，地址像这样：

```
*address = ...;
```

在转换之后，变成：

```
if (IsPoisoned(address)) {
    ReportError(address, kAccessSize, kIsWrite);
}
*address = ...;
```

这意味着，如果存在非法访问内存，就会报错。

在前面的例子中，我们为缓冲区溢出写了一段代码，发生数组访问越界了。这里，数组前后的地址都进行了代码仪表化的工作。当试图访问数组上界之外的内容时，即访问红色区域，地址sanitizer就会报告stack buffer overflow错误。

## 另请参阅

- 关于地址sanitizer的文档，请参见<http://clang.llvm.org/docs/AddressSanitizer.html>。
- 关于LLVM中使用的其他sanitizer，请参见：  
<http://clang.llvm.org/docs/MemorySanitizer.html>  
<http://clang.llvm.org/docs/ThreadSanitizer.html>  
<https://code.google.com/p/address-sanitizer/wiki/LeakSanitizer>

# 使用LLVM编写垃圾回收器

垃圾回收（Garbage collection）是一种由垃圾回收器（Garbage Collector）自动回收不再使用的对象内存的内存管理技术，这减小了程序员记录堆区对象生命周期的压力。

本节介绍如何把LLVM整合到一个支持垃圾回收的语言中去。 LLVM自身不提供垃圾回收器，但是提供了一个描述垃圾回收器的框架，以便于程序员编写自己的垃圾回收器。

## 准备工作

必须构建和安装LLVM。

## 详细步骤

下面展示包含垃圾回收内建函数的LLVM IR代码如何转到相应的机器汇编代码。

1. 编写测试代码：

```
$ cat testgc.ll

declare i8* @llvm_gc_allocate(i32)
declare void @llvm_gc_initialize(i32)

declare void @llvm.gcroot(i8**, i8*)
declare void @llvm.gcwrite(i8*, i8*, i8**)

define i32 @main() gc "shadow-stack" {
entry:
%A = alloca i8*
%B = alloca i8**
```

```

call void @llvm_gc_initialize(i32 1048576) ; Start with 1MB heap

    ;; void *A;
call void @llvm.gcroot(i8** %A, i8* null)

    ;; A = galloc(10);
%Aptr = call i8* @llvm_gc_allocate(i32 10)
store i8* %Aptr, i8** %A

    ;; void **B;
%tmp.1 = bitcast i8*** %B to i8**
call void @llvm.gcroot(i8** %tmp.1, i8* null)

    ;; B = galloc(4);
%B.upgrd.1 = call i8* @llvm_gc_allocate(i32 8)
%tmp.2 = bitcast i8* %B.upgrd.1 to i8**
store i8** %tmp.2, i8*** %B
    ;; *B = A;
%B.1 = load i8**, i8*** %B
%A.1 = load i8*, i8** %A
call void @llvm.gcwrite(i8* %A.1, i8* %B.upgrd.1, i8** %B.1)

br label %AllocLoop

AllocLoop:
%i = phi i32 [ 0, %entry ], [ %indvar.next, %AllocLoop ]
    ;; Allocated mem: allocated memory is immediately dead.
call i8* @llvm_gc_allocate(i32 100)

%indvar.next = add i32 %i, 1
%exitcond = icmp eq i32 %indvar.next, 10000000
br i1 %exitcond, label %Exit, label %AllocLoop

Exit:
    ret i32 0
}

declare void @_main()

```

2. 使用llc工具生成汇编码，并使用cat命令查看汇编码：

```
$ llc testgc.ll
```

```
$ cat testgc.s
.text
```

```

.file "testgc.ll"
.globl main
.align 16, 0x90
.type main,@function
main:          # @main
.Lfunc_begin0:
    .cfi_startproc
    .cfi_personality 3, __gcc_personality_v0
    .cfi_lsda 3, .Lexception0
# BB#0:          # %entry
    pushq %rbx
.Ltmp9:
    .cfi_def_cfa_offset 16
    subq $32, %rsp
.Ltmp10:
    .cfi_def_cfa_offset 48
.Ltmp11:
    .cfi_offset %rbx, -16
    movq llvm_gc_root_chain(%rip), %rax
    movq $__gc_main, 8(%rsp)
    movq $0, 16(%rsp)
    movq %rax, (%rsp)
    leaq (%rsp), %rax
    movq %rax, llvm_gc_root_chain(%rip)
    movq $0, 24(%rsp)
.Ltmp0:
    movl $1048576, %edi      # imm = 0x100000
    callq llvm_gc_initialize
.Ltmp1:
# BB#1:          # %entry.cont3
.Ltmp2:
    movl $10, %edi
    callq llvm_gc_allocate
.Ltmp3:
# BB#2:          # %entry.cont2
    movq %rax, 16(%rsp)
.Ltmp4:
    movl $8, %edi
    callq llvm_gc_a
.Ltmp5:
# BB#3:          # %entry.cont
    movq %rax, 24(%rsp)
    movq 16(%rsp), %rcx
    movq %rcx, (%rax)
    movl $100000000, %ebx    # imm = 0x989680
    .align 16, 0x90
.LBB0_4:          # %AllocLoop
# =>This Inner Loop

```

```

Header: Depth=1
.Ltmp6:
    movl $100, %edi
    callq llvm_gc_allocate
.Ltmp7:
# BB#5:          # %AllocLoop.cont
#      in Loop: Header=BB0_4
Depth=1
    decl %ebx
    jne .LBB0_4
# BB#6:          # %Exit
    movq (%rsp), %rax
    movq %rax, llvm_gc_root_chain(%rip)
    xorl %eax, %eax
    addq $32, %rsp
    popq %rbx
    retq
.LBB0_7:         # %gc_cleanup
.Ltmp8:
    movq (%rsp), %rcx
    movq %rcx, llvm_gc_root_chain(%rip)
    movq %rax, %rdi
    callq _Unwind_Resume
.Lfunc_end0:
    .size main, .Lfunc_end0-main
    .cfi_endproc
    .section .gcc_except_table,"a",@progbits
    .align 4
GCC_except_table0:
.Lexception0:
    .byte 255          # @LPStart Encoding = omit
    .byte 3             # @TType Encoding = udata4
    .asciz "\234"       # @TType base offset
    .byte 3             # Call site Encoding = udata4
    .byte 26            # Call site table length
    .long .Ltmp0-.Lfunc_begin0    # >> Call Site 1 <<
    .long .Ltmp7-.Ltmp0        # Call between .Ltmp0 and
.Ltmp7
    .long .Ltmp8-.Lfunc_begin0    #     jumps to .Ltmp8
    .byte 0             # On action: cleanup
    .long .Ltmp7-.Lfunc_begin0    # >> Call Site 2 <<
    .long .Lfunc_end0-.Ltmp7      # Call between .Ltmp7 and
.Lfunc_end0
    .long 0              #     has no landing pad
    .byte 0              # On action: cleanup
    .align 4
.type llvm_gc_root_chain,@object    # @llvm_gc_root_chain

```

```

.bss
.weak llvm_gc_root_chain
.align 8
llvm_gc_root_chain:
.quad 0
.size llvm_gc_root_chain, 8

.type __gc_main,@object      # @_gc_main
.section .rodata,"a",@progbits
.align 8
__gc_main:
.long 2          # 0x2
.long 0          # 0x0
.size __gc_main, 8

.section ".note.GNU-stack","",@progbits

```

## 工作原理

前面例子的主函数中，我们使用了内建的垃圾回收器策略shadow-stack，它会维护栈roots()的链接列表：

```
define i32 @main() gc "shadow-stack"
```

它镜像了机器栈。我们可以提供其他的垃圾回收技术，只需要在函数名后面指定gc策略的名字，例如gc"strategy name"，策略名字可以是内建的策略，也可以是自己定义的垃圾回收策略。

为了发现GC root，也就是堆区对象的指针，LLVM使用了内建函数@llvm.gcroot，或者.statepoint重定位序列。llvm.gcroot内建函数通知LLVM这是一个栈上变量对堆区对象的引用，垃圾回收器需要跟踪这个堆区对象。下面的代码就是调用llvm.gcroot函数来标记%tmp.1栈变量：

```
call void @llvm.gcroot(i8** %tmp.1, i8* null)
```

llvm.gcwrite函数则是写屏障（write barrier），这意味着使用了垃圾回收的程序把一个指针写到堆区对象的字段中，因此会通知垃圾回收器。于此相似的是llvm.gcread，llvm.gcread内建函数表示程序从堆区对

象的字段读一个指针，也会通知垃圾回收器。下面的代码将%A.1的值写入%B.upgrd堆区对象。

```
Call void @llvm.gcwrite(i8* %A.1, i8* %B.upgrd.1, i8** %b.1)
```

需要注意，LLVM不提供垃圾回收器，它应当是语言运行时库的一部分。之前的例子展示了LLVM为描述垃圾回收器提供的必要工具。

## 另请参阅

- 关于垃圾回收的详细信息，请参见  
<http://llvm.org/docs/GarbageCollection.html>。
- 关于其他的垃圾回收方法，请参见  
<http://llvm.org/docs/Statepoints.html>。

# 将LLVM IR转换为JavaScript

本节将简要讨论如何把LLVM IR转为JavaScript。

## 准备工作

执行以下步骤，把LLVM IR转为JavaScript。

1. 我们使用emscripten工具把LLVM IR转为JavaScript。你需要先从[https://kripken.github.io/emscripten-site/docs/getting\\_started/downloads.html](https://kripken.github.io/emscripten-site/docs/getting_started/downloads.html)下载SDK，或者也可以从源码构建，但仅仅为了实验，推荐使用工具链中的SDK。
2. 在下载SDK之后，请解压并切换到其根目录。
3. 安装default-jre、nodejs、cmake、build-essential、git依赖。
4. 执行以下命令安装SDK：

```
./emsdk update  
./emsdk install latest  
./emsdk activate latest
```

5. 执行./emscripten脚本检查是否有正确的值，否则进行相应的更新。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 编写测试代码，以进行从IR到JavaScript的转换：

```
$ cat test.c
#include<stdio.h>

int main() {
    printf("hi, user!\n");
    return 0;
}
```

2. 把代码转换为LLVM IR:

```
$ clang -S -emit-llvm test.c
```

3. 执行emsdk\_portable/emscripten/master目录的emcc把.ll文件当作输入并转为JavaScript:

```
$ ./emcc test.ll
```

4. 输出文件是a.out.js文件，用以下命令执行这个文件:

```
$ nodejs a.out.js
hi, user!
```

## 另请参阅

- 更多细节，请参见<https://github.com/kripken/emscripten>。

# 使用Clang静态分析器

本节介绍通过Clang静态分析器对代码进行静态分析。它基于Clang和LLVM构建，它使用的静态分析引擎是一个Clang库，因此具有较高的可重用性，并能够在不同的客户端中使用。

我们会以除零错误为例，展示Clang静态分析器如何处理这个错误。

## 准备工作

你需要构建并安装LLVM和Clang。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 创建测试文件，编写以下测试代码：

```
$ cat sa.c
int func() {
int a = 0;
int b = 1/a;
return b;
}
```

2. 通过以下的命令行选项来运行Clang静态分析器，在屏幕上得到输出：

```
$ clang -cc1 -analyze -analyzer-checker=core.DivideZero sa.c
sa.c:3:10: warning: Division by zero
int b = 1/a;
```

~^~  
**1 warning generated.**

## 工作原理

程序会被静态分析器核心象征性地执行，程序的输入值都是象征性的组。表达式的值也是基于输入的符号和路径计算的。代码的执行是与路径相关的，因此每一条可能路径都会被分析。

执行的时候，执行轨迹由爆炸图（exploded graph）来表示，每一个ExplodedGraph上的节点称为ExplodedNode，它由一个ProgramState对象（表示程序的抽象状态），以及一个ProgramPoint对象（表示程序的相应地址），所组成。

对于每一种类型的bug，都有一个对应的checker。在构建ProgramState的时候，每个checker都会链接到分析器的核心。每次分析引擎探测一个新的语句的时候，它会通知每一个注册的checker去监听这个语句，给它报告bug或者修改语句的机会。

每一个checker则会注册不同的事件和回调函数，例如PreCall（在函数调用之前），DeadSymbols（符号失效）等。不同的事件会通知不同的checker，它们也会执行不同的动作。

本节我们使用了除零checker，它会报告除零的错误。这个checker注册了PreStmt回调，在语句执行之前调用。检查下一条语句的运算符，如果是除法运算符，则检查除数是否为0，如果找到可能的值则报告bug。

## 另请参阅

- 关于静态分析器和checker的更多实现细节，请参见[http://clang-analyzer.llvm.org/checker\\_dev\\_manual.html](http://clang-analyzer.llvm.org/checker_dev_manual.html)。

# 使用bugpoint

本节介绍LLVM提供的一个有用的工具——bugpoint。bugpoint允许我们减小LLVM工具和Pass的问题规模，在调试优化器崩溃、优化器误编译、坏的本地代码生成方面会很有效。通过它，我们可以缩小问题的规模，在一个较小的测试用例下进行研究。

## 准备工作

你需要构建安装LLVM。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 编写bugpoint工具的测试用例：

```
$ cat crash-narrowfunctiontest.ll
define i32 @foo() { ret i32 1 }

define i32 @test() {
    call i32 @test()
    ret i32 %1
}
define i32 @bar() { ret i32 2 }
```

2. 在测试用例中使用bugpoint来查看结果：

```
$ bugpoint -load path-to-llvm/build./lib/BugpointPasses.so
crash-narrowfunctiontest.ll -output-prefix
crash-narrowfunctiontest.ll.tmp -bugpoint-crashcalls -silence-
passes
```

```
Read input file : 'crash-narrowfunctiontest.ll'
*** All input ok
Running selected passes on program to test for crash: Crashed: Ab
(core dumped)
Dumped core

*** Debugging optimizer crash!
Checking to see if these passes crash: -bugpoint-
crashcalls: Crashed:
Aborted (core dumped)
Dumped core

*** Found crashing pass: -bugpoint-crashcalls
Emitted bitcode to 'crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-passes.bc'
*** You can reproduce the problem with: opt
crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-passes.bc -load
/home/mayur/LLVMSVN_REV/ llvm/llvm/rbuild./lib/BugpointPasses.so
-bugpoint-crashcalls

*** Attempting to reduce the number of functions in the testcase
Checking for crash with only these functions: foo test bar: Crash
Aborted (core dumped)
Dumped core
Checking for crash with only these functions: foo test: Crashed:
(core dumped)
Dumped core
Checking for crash with only these functions: test: Crashed: Abor
dumped)
Dumped core
Emitted bitcode to
'crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-reduced-function.bc'

*** You can reproduce the problem with: opt
crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-reduced-function.bc
load /home/mayur/
LLVMSVN_REV/llvm/llvm/rbuild./lib/BugpointPasses.so
-bugpoint-crashcalls
Checking for crash with only these blocks: : Crashed: Aborted (co
Dumped core
Emitted bitcode to 'crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-reduced-
blocks.bc'

*** You can reproduce the problem with: opt
crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-reduced-blocks.bc
load /home/mayur/
LLVMSVN_REV/llvm/llvm/rbuild./lib/BugpointPasses.so
-bugpoint-crashcalls
Checking for crash with only 1 instruction: Crashed: Aborted (cor
```

Dumped core

```
*** Attempting to reduce testcase by deleting instructions:  
Simplification Level #1  
Checking instruction: %1 = call i32 @test()Success!  
  
*** Attempting to reduce testcase by deleting instructions:  
Simplification Level #0  
Checking instruction: %1 = call i32 @test()Success!  
  
*** Attempting to perform final cleanups: Crashed: Aborted (core  
Dumped core  
Emitted bitcode to  
'crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-reduced-simplified.bc'  
  
*** You can reproduce the problem with: opt  
crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-reduced-simplified.bc -load  
/home/mayur/LLVMSVN_REV/llvm/llvm/rbuild./lib/BugpointPasses.so  
-bugpoint-crashcalls
```

3. 为了查看简化过的测试用例，使用llvm-dis命令把crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-reduced-simplified.bc文件转为.ll形式，然后查看缩小的测试用例：

```
$ llvm-dis crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-reduced-simplified.bc  
$ cat $ cat crash-narrowfunctiontest.ll.tmp-reduced-simplified.ll  
define void @test() {  
  call void @test()  
  ret void  
}
```

## 工作原理

bugpoint工具会执行测试程序命令行中的所有Pass，如果有Pass崩溃了，那么就会调用崩溃调试器。崩溃调试器会尝试简化导致崩溃的Pass列表，减少不必要的函数，删除控制流图上的边，甚至会把测试程序缩减到一个函数。之后，它会删除与崩溃无关的LLVM指令。最后，它简洁明了地指出了导致崩溃的Pass，以及已简化过的测试用例。

如果没有指定-output选项，bugpoint会在一个"safe"一代的后端运行

程序并得到参考输出，然后比较这里的输出和选定的代码生成器的输出。如果发生崩溃，会调用前面提到的崩溃调试器。除此之外，如果代码生成器产生的输出和参考输出不同，会启动代码生成器调试器，它的简化测试用例的技术与崩溃调试器相似。

最后，如果代码生成器的输出和参考输出相同，bugpoint会运行所有的LLVM Pass并对照参考输出来检查输出。如果有任何的不匹配，就会启动错误编译调试器。这个错误编译调试器在工作的时候会把测试程序分成两块，在一块运行优化，然后把两块链接到一起得到结果。它尝试把问题减小到导致错误编译的那个Pass，然后精确指出错误的测试程序的位置。最后输出简化过的导致错误编译的用例。

在之前的测试用例中，bugpoint会检查所有函数的崩溃情况，最终定位到错误出在测试函数中。它也会尝试简化函数中的指令。在检查过程中，每一阶段的输出都会以自说明的方式显示在终端上。最后，产生一个简化的bitcode格式的测试用例，我们能把它转为LLVM IR来获得简化的测试用例。

## 另请参阅

- 关于bugpoint的更多信息，请参见  
<http://llvm.org/docs/Bugpoint.html>。

# 使用LLDB

本节介绍LLVM提供的调试工具——LLDB。LLDB是新一代的高性能调试器，由高可重用性的一系列组件构成，对于大型LLVM项目中的现存库是有优势的。事实上，你会发现它和gdb调试工具非常相似。

## 准备工作

在使用LLDB之前需要以下两步。

1. 为了使用LLDB，先在llvm/tods目录下查看LLDB的源码：

```
svn co http://llvm.org/svn/llvm-project/lldb/trunk lldb
```

2. 构建和安装LLVM，同时会构建LLDB。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 为使用LLDB编写一个简单的测试用例：

```
$ cat lldbexample.c
#include<stdio.h>
int globalvar = 0;

int func2(int a, int b) {
    globalvar++;
    return a*b;
}

int func1(int a, int b) {
```

```
globalvar++;
int d = a + b;
int e = a - b;
int f = func2(d, e);
return f;
}

int main() {
globalvar++;
int a = 5;
int b = 3;

int c = func1(a,b);
printf("%d", c);
return c;
}
```

2. 使用-g参数调用Clang编译代码，可以产生调试信息：

```
$ clang -g lldbexample.c
```

3. 使用LLDB调试之前文件生成的输出文件，把文件名传递给LLDB，以加载输出文件：

```
$ lldb a.out
(lldb) target create "a.out"
Current executable set to 'a.out' (x86_64).
```

4. 在主函数设置断点：

```
(lldb) breakpoint set --name main
Breakpoint 1: where = a.out'main + 15 at lldbexample.c:20,
address = 0x00000000004005bf
```

5. 使用以下命令查看断点集合的列表：

```
(lldb) breakpoint list
Current breakpoints:
1: name = 'main', locations = 1
  1.1: where = a.out'main + 15 at lldbexample.c:20, address =
a.out[0x00000000004005bf], unresolved, hit count = 0
```

6. 设置在命中断点时执行的命令。这里设置在命中主函数中的断点时执行回溯，bt命令：

```
(lldb) breakpoint command add 1.1
Enter your debugger command(s). Type 'DONE' to end.
> bt
> DONE
```

7. 使用以下命令执行文件，它会触发在main函数的断点，然后执行回溯(bt)命令，正如前一步所设置的：

```
(lldb) process launch
Process 2999 launched: '/home/mayur/book/chap9/a.out' (x86_64)
Process 2999 stopped
* thread #1: tid = 2999, 0x00000000004005bf a.out'main + 15 at
lldbexample.c:20, name = 'a.out', stop reason = breakpoint 1.1
    frame #0: 0x00000000004005bf a.out'main + 15 at
lldbexample.c:20
    17
    18
    19    int main() {
-> 20        globalvar++;
    21        int a = 5;
    22        int b = 3;
    23
(lldb) bt
* thread #1: tid = 2999, 0x00000000004005bf a.out'main + 15 at
lldbexample.c:20, name = 'a.out', stop reason = breakpoint 1.1
    * frame #0: 0x00000000004005bf a.out'main + 15 at
lldbexample.c:20
        frame #1: 0x00007ffff7a35ec5 libc.so.6'__libc_start_
main(main=0x00000000004005b0, argc=1, argv=0x00007fffffffda18,
init=<unavailable>, fini=<unavailable>, rtld_fini=<unavailable>,
stack_end=0x00007fffffffda08) + 245 at libc-start.c:287
    frame #2: 0x0000000000400469 a.out</b>
```

8. 使用以下命令，在全局变量设置watchpoint：

```
(lldb) watch set var globalvar
Watchpoint created: Watchpoint 1: addr = 0x00601044 size = 4 stat
enabled type = w
declare @ '/home/mayur/book/chap9/lldbexample.c:2'
watchpoint spec = 'globalvar'
```

```
new value: 0
```

9. 设置当globalvar的值为3的时候停止执行， 使用watch命令：

```
(lldb) watch modify -c '(globalvar==3)'
To view list of all watch points:
(lldb) watch list
Number of supported hardware watchpoints: 4
Current watchpoints:
Watchpoint 1: addr = 0x00601044 size = 4 state = enabled type = w
  declare @ '/home/mayur/book/chap9/lldbexample.c:2'
  watchpoint spec = 'globalvar'
  new value: 0
  condition = '(globalvar==3)'
```

10. 使用以下命令在主函数之后继续执行。遇到globalvar的值变为3的时候会停止，进入func2函数：

```
(lldb) thread step-over
(lldb) Process 2999 stopped
* thread #1: tid = 2999, 0x000000000040054b a.out'func2(a=8, b=2)
at lldbexample.c:6, name = 'a.out', stop reason = watchpoint 1
    frame #0: 0x000000000040054b a.out'func2(a=8, b=2) + 27 at
lldbexample.c:6
  3
  4      int func2(int a, int b) {
  5          globalvar++;
-> 6          return a*b;
  7      }
  8
  9

Watchpoint 1 hit:
old value: 0
new value: 3
(lldb) bt
* thread #1: tid = 2999, 0x000000000040054b a.out'func2(a=8, b=2)
at lldbexample.c:6, name = 'a.out', stop reason = watchpoint 1
  * frame #0: 0x000000000040054b a.out'func2(a=8, b=2) + 27 at
lldbexample.c:6
    frame #1: 0x000000000040059c a.out'func1(a=5, b=3) + 60 at
lldbexample.c:14
    frame #2: 0x00000000004005e9 a.out'main + 57 at lldbexample.c
    frame #3: 0x00007ffff7a35ec5 libc.so.6'__libc_start_
```

```
main(main=0x00000000004005b0, argc=1, argv=0x00007fffffffda18,
init=<unavailable>, fini=<unavailable>, rtld_fini=<unavailable>,
stack_end=0x00007fffffffda08) + 245 at libc-start.c:287
frame #4: 0x0000000000400469 a.out
```

11. 使用thread continue命令继续执行，如果没有遇到断点的话，会执行到结束：

```
(lldb) thread continue
Resuming thread 0x0bb7 in process 2999
Process 2999 resuming
Process 2999 exited with status = 16 (0x00000010)
```

12. 使用以下命令退出LLDB：

```
(lldb) exit
```

## 另请参阅

- 关于LLDB命令的详细列表，请参见  
<http://lldb.llvm.org/tutorial.html>。

# 使用LLVM通用Pass

本节介绍LLVM的通用Pass。如同名字所暗示的，它们是提供给用户帮助理解LLVM特定组件的一些通用工具，通常来说，直接查看代码来理解这些组件会非常困难。本节会介绍两个展示程序控制流图的通用Pass。

## 准备工作

你需要构建和安装LLVM，并安装graphviz工具，可以选择从<http://www.graphviz.org/Download.php>下载graphviz，或者如果你机器的可用包列表中有这个工具，也可以从包管理器进行安装。

## 详细步骤

执行以下步骤。

1. 为运行通用Pass编写测试代码，测试代码包含if块，会在控制流图中创建一个新的边：

```
$ cat utility.ll
declare double @foo()

declare double @bar()

define double @baz(double %x) {
entry:
%ifcond = fcmp one double %x, 0.000000e+00
br i1 %ifcond, label %then, label %else

then:      ; preds = %entry
%calltmp = call double @foo()
br label %ifcont
```

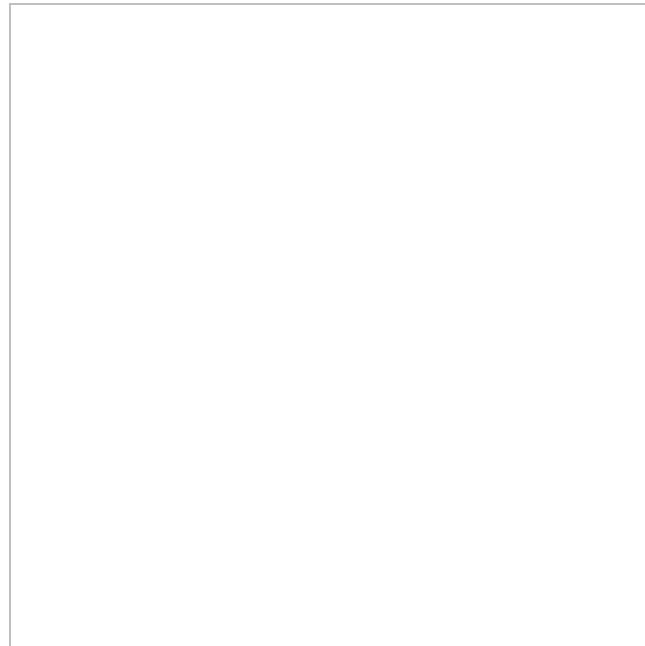
```
else:      ; preds = %entry
    %calltmp1 = call double @bar()
    br label %ifcont

ifcont:     ; preds = %else, %then
    %iftmp = phi double [ %calltmp, %then ], [ %calltmp1, %else ]
    ret double %iftmp
}
```

2. 运行view-cfg-onlyPass，查看函数的控制流图，不包括函数体：

```
$ opt -view-cfg-only utility.ll
```

3. 使用graphviz工具查看dot文件：



4. 运行view-domPass查看函数的支配者树：

```
$ opt -view-dom utility.ll
```

5. 使用graphviz工具查看dot文件：



## 另请参阅

- 关于其他可用的工具Pass，请参见  
<http://llvm.org/docs/Passes.html#utility-passes>。

# Table of Contents

[扉页](#)

[目录](#)

[版权页](#)

[内容简介](#)

[译者序](#)

[关于作者](#)

[关于审校者](#)

[前言](#)

[第1章 LLVM设计与使用](#)

[概述](#)

[模块化设计](#)

[交叉编译Clang/LLVM](#)

[将C源码转换为LLVM汇编码](#)

[将LLVM IR转换为bitcode](#)

[将LLVM bitcode转换为目标平台汇编码](#)

[将LLVM bitcode转回为LLVM汇编码](#)

[转换LLVM IR](#)

[链接LLVM bitcode](#)

[执行LLVM bitcode](#)

[使用C语言前端——Clang](#)

[使用GO语言前端](#)

[使用DragonEgg](#)

[第2章 实现编译器前端](#)

[概述](#)

[定义TOY语言](#)

[实现词法分析器](#)

[定义抽象语法树](#)

[实现语法分析器](#)

[解析简单的表达式](#)

[解析二元表达式](#)

[为解析编写驱动](#)

[对TOY语言进行词法分析和语法分析](#)

[为每个AST类定义IR代码生成方法](#)

[为表达式生成IR代码](#)

[为函数生成IR代码](#)

[增加IR优化支持](#)

## [第3章 扩展前端并增加JIT支持](#)

[概述](#)

[处理条件控制结构——if/then/else结构](#)

[生成循环结构](#)

[处理自定义二元运算符](#)

[处理自定义一元运算符](#)

[增加JIT支持](#)

## [第4章 准备优化](#)

[概述](#)

[多级优化](#)

[自定义LLVM Pass](#)

[使用opt工具运行自定义Pass](#)

[在新的Pass中调用其他Pass](#)

[使用Pass管理器注册Pass](#)

[实现一个分析Pass](#)

[实现一个别名分析Pass](#)

[使用其他分析Pass](#)

## [第5章 实现优化](#)

[概述](#)

[编写无用代码消除Pass](#)

[编写内联转换Pass](#)

[编写内存优化Pass](#)

[合并LLVM IR](#)

[循环的转换与优化](#)

[表达式重组](#)

[IR向量化](#)

[其他优化Pass](#)

## [第6章 平台无关代码生成器](#)

[概述](#)

[LLVM IR指令的生命周期](#)

[使用GraphViz可视化LLVM IR控制流图](#)

[使用TableGen描述目标平台](#)

[定义指令集](#)

[添加机器码描述](#)

[实现MachineInstrBuilder类](#)  
[实现MachineBasicBlock类](#)  
[实现MachineFunction类](#)  
[编写指令选择器](#)  
[合法化SelectionDAG](#)  
[优化SelectionDAG](#)  
[基于DAG的指令选择](#)  
[基于SelectionDAG的指令调度](#)

## [第7章 机器码优化](#)

[概述](#)  
[消除机器码公共子表达式](#)  
[活动周期分析](#)  
[寄存器分配](#)  
[插入头尾代码](#)  
[代码发射](#)  
[尾调用优化](#)  
[兄弟调用优化](#)

## [第8章 实现LLVM后端](#)

[概述](#)  
[定义寄存器和寄存器集合](#)  
[定义调用约定](#)  
[定义指令集](#)  
[实现栈帧lowering](#)  
[打印指令](#)  
[选择指令](#)  
[增加指令编码](#)  
[子平台支持](#)  
[多指令lowering](#)  
[平台注册](#)

## [第9章 LLVM项目最佳实践](#)

[概述](#)  
[LLVM中的异常处理](#)  
[使用sanitizer](#)  
[使用LLVM编写垃圾回收器](#)  
[将LLVM IR转换为JavaScript](#)  
[使用Clang静态分析器](#)  
[使用bugpoint](#)

[使用LLDB](#)

[使用LLVM通用Pass](#)